

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

FACHBEREICH D - BAUINGENIEURWESEN



LEHR- UND FORSCHUNGSGEBIET COMPUTERSIMULATION FÜR
BRANDSCHUTZ UND FUSSGÄNGERVERKEHR

BACHELOR THESIS

PIV-BASIERTE STRÖMUNGSMESSUNGEN IM MODELLMASSSTAB:
SIMULATION UND VALIDIERUNG

Name:	Anna Lisa Tscherniewski
Studiengang:	Bachelor of Science, Bauingenieurwesen
Matrikelnummer:	1164859
Hochschullehrer:	Univ.-Prof. Dr. Armin Seyfried
Betreuer:	Benjamin Schröder, M.Sc.
Ausgabe:	21.01.2015
Abgabe:	25.03.2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Bachelor Thesis selbstständig angefertigt habe und mich dabei nicht anderer als der von mir angegebenen Quellen bedient habe.

Wuppertal, den 25.03.2015

Anna Lisa Tscherniewski

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
Variablenverzeichnis	V
Aufgabenstellung	VI
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Allgemeines zu PIV und den Experimenten	2
1.3 Allgemeines zur Simulation mit FDS	4
2 Simulation	5
2.1 Aufbau einer Simulation	5
2.2 Gitterstudie	10
2.2.1 Hintergrund	10
2.2.2 Durchführung und Ergebnisse	10
2.3 Sensitivitätsanalyse	15
2.3.1 Anfangstemperaturen	15
2.3.2 Heizquelle	19
3 Auswertung Simulation	21
3.1 Allgemeines	21
3.2 Strömungsprofile	21
3.3 Geschwindigkeitskomponente „w“ und Flächenströme	24
3.4 Turbulenzen	29
3.4.1 Allgemeines	29
3.4.2 Turbulenzeffekte	29
3.4.3 Standardabweichung	32
4 Auswertung Experimente	34
4.1 Allgemeines	34
4.2 Entstehung von Turbulenzeffekten	34
4.3 Standardabweichung	35

5 Vergleich Experimente und Simulationen	37
5.1 Allgemeines	37
5.2 Strömungsprofile, Geschwindigkeitskomponente „w“ und Flächenströme	37
5.3 Turbulenzen	44
5.4 Konvektive Wärmefreisetzung	46
6 Fazit	48
Literaturverzeichnis	49
Anhang	51
Technische Zeichnung Heizblock	51
Eingabecode Simulation mit FDS	52
Diagramme Gitterstudie	57
Python Code Gitterstudie	62
Python Code Anfangstemperaturen	66
Python Code Strömungsprofil ganz	68
Python Code Strömungsprofil 10cm mit Höhen	69
Python Code Geschwindigkeitskomponente „w“	71
Python Code Standardabweichung Simulation	74
Python Code Standardabweichung Experiment	76

Abbildungsverzeichnis

1.1	Versuchsaufbau mit aufgespannter Laserebene	2
2.1	Modellaufbau der Simulation	8
2.2	Gitterstudie Temperaturmessung bei 50°C und 200°C	11
2.3	Gitterstudie Wärmestrom bei 50°C und 100°C	12
2.4	Gitterstudie Geschwindigkeiten bei 50°C und 100°C	13
2.5	Gitterstudie Volumenstrom bei 200°C und Geschwindigkeit bei 250°C	14
2.6	Umgebungstemperaturen bei 50°C	15
2.7	Umgebungstemperaturen bei 250°C	16
2.8	Umgebungstemperaturen nach 25 Minuten	18
3.1	Strömungsprofil bei 50°C	22
3.2	Strömungsprofil bei 100°C, 150°C und 200°C	23
3.3	Strömungsprofil bei 250°C	23
3.4	z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 50°C	25
3.5	z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 100°C	25
3.6	z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 150°C	26
3.7	z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 200°C	27
3.8	z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 250°C	28
3.9	Wirbel bei 200°C	29
3.10	Doppelstrahl bei 200°C	30
3.11	Wirbel bei 250°C	31
3.12	Doppelstrahl bei 250°C	31
3.13	Standardabweichung Geschwindigkeitskomponente „u“ (Simulationen)	32
4.1	Wirbelentstehung bei 200°C und an der Decke bei 250°C	35
4.2	Standardabweichung Geschwindigkeitskomponente „u“ (Experimente)	36
5.1	Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 50°C	38
5.2	Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 100°C	39
5.3	Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 150°C	40
5.4	Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 200°C	41
5.5	Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 250°C	42
5.6	Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente „u“	44
5.7	Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente „u“	45

Tabellenverzeichnis

2.1	Temperaturen der Messpunkte für 50°C im Vergleich	17
2.2	Temperaturen der Messpunkte für 100°C im Vergleich	17
2.3	Temperaturen der Messpunkte für 150°C im Vergleich	17
2.4	Temperaturen der Messpunkte für 200°C im Vergleich	17
2.5	Temperaturen der Messpunkte für 250°C im Vergleich	18
2.6	Annahme Temperaturen Heizblock	20
2.7	Temperaturen Heizblock neu	20
3.1	Höhen zur Auswertung der Geschwindigkeitskomponente „w“	24
5.1	Vergleich Flächenströme bei 50°C	39
5.2	Vergleich Flächenströme bei 100°C	40
5.3	Vergleich Flächenströme bei 150°C	41
5.4	Vergleich Flächenströme bei 200°C	42
5.5	Vergleich Flächenströme bei 250°C	42
5.6	Summe der Differenzen aus den Flächenströmen	43
5.7	Konvektive Wärmefreisetzung in den Experimenten für die realisierten Heizblocktemperaturen der Simulationen	46
5.8	Konvektive Wärmefreisetzung im Vergleich	47
5.9	Konvektive Wärmefreisetzung in den Experimenten	47

Variablenverzeichnis

Variable	Definition	Einheit
ΔP_{rad}	Radiative Wärmefreisetzung	W
ΔP_{konv}	Konvektive Wärmefreisetzung	W
A	Oberfläche Heizblock	m ²
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
ϵ	Emissionsgrad	dimensionslos
T_{surf}	Oberflächentemperatur	K
T_{∞}	Umgebungstemperatur	K
T_{Heiz}	Heizblocktemperatur	

Aufgabenstellung

Die Bachelor Thesis von Anna Lisa Tscherniewski soll sich mit der Simulation von Strömungsexperimenten im Modellmaßstab beschäftigen. Die detaillierte Aufgabenstellung lautet wie folgt:

Im Brandschutzingenieurwesen werden unter Berücksichtigung ähnlichkeitstheoretischer Gesetzmäßigkeiten zunehmend Experimente im Modellmaßstab durchgeführt, um beispielsweise die Funktionalität von Entrauchungssystemen zu untersuchen. Die Versuche werden in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich durchgeführt und stellen außerdem die Grundlage für eine weitere Bachelor Thesis mit dem Schwerpunkt „Experimente und Datenauswertung“ dar. Da beide Arbeiten gemeinsame Schnittpunkte haben, ist eine enge Abstimmung bei der Bearbeitung beider Themen sinnvoll.

Die Experimente sollen der Validierung von Brandsimulationsmodellen dienen, weshalb eine konvektiv getriebene Strömung untersucht wird. Da es sich um Grundlagen-Experimente handelt, ist der Aufbau einfach gehalten: Der Fokus liegt auf dem Auftriebsstrahl, der sich oberhalb eines elektrisch beheizten Kupferblocks ausbildet. Zur Auswertung wird das Messverfahren *Particle Image Velocimetry* (PIV) eingesetzt, mit dessen Hilfe eine nicht-invasive Strömungsmessung vorgenommen werden kann. Aufgrund des Aufwands und der Komplexität des Messverfahrens wurde dieses im Brandschutzingenieurwesen bislang wenig angewandt. Die Motivation der Experimente, der Versuchsaufbau sowie die Messtechnik und Datenaufbereitung sollen in dieser Thesis nur zusammenfassend dargestellt werden, da diese den Schwerpunkt der zweiten Bachelor Thesis darstellen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Simulation der durchgeführten Experimente. Dabei wird das weit verbreitete Brandsimulationsmodell *Fire Dynamics Simulator* (FDS) untersucht, das auf den Ansatz der *Computational Fluid Dynamics* (CFD) basiert.

Im Kontext der simulationsgestützten Nachbildung der Experimente sollen folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

- Modellierung des Experimentalaufbaus insbesondere unter Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe.

- Durchführung von Gitterstudien, um den Einfluss der Gitterauflösung auf die Reproduzierbarkeit der Experimentalergebnisse zu bestimmen.
- Untersuchung der Sensitivität weiterer Einflussgrößen, z.B. Abstand Gittergrenzen, Anfangstemperatur im Experimentalaufbau, CFD-spezifische Modellparameter etc.
- Die Modellierung der Wärmequelle mit Hilfe von Randbedingungen unter Berücksichtigung heterogener Oberflächentemperaturen basierend auf Thermographieaufnahmen.
- Automatisiertes Processing der FDS-Ausgabedaten mit Hilfe von Python.
- Ermittlung der eingebrachten konvektiven/radiativen Wärmefreisetzung in Abhängigkeit der Wärmequellentemperatur.
- Vergleich relevanter Kenngrößen der Strömung für verschiedene Wärmequellentemperaturen und Messhöhen zwischen Experimenten und Simulationen sowie Quantifizierung der Abweichungen.
- Untersuchungen zur Entstehung von Turbulenzeffekten bei höheren Oberflächentemperaturen mit Hilfe der Betrachtung von Einzelbildern anstelle gemittelter Aufnahmen:
 - Ähneln sich die dynamischen Strömungsbilder bzw. die Ausbreitung von „Wirbeln“?
 - Auswertung beispielsweise entlang der Plumemittelachse: Plotten der Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung über alle Aufnahmen eines Versuchs.

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Diese Thesis befasst sich mit den Voruntersuchungen zur Brandsimulation in U-Bahnhöfen im Modellmaßstab. Grundlage dafür bilden Strömungsexperimente, die mit einer im Brandschutz bisher wenig angewandten Messtechnik, der *Particle Images Velocimetry* (PIV), durchgeführt werden.

Im Speziellen wird die Simulation dieser Strömungsexperimente mit dem Brandsimulationsmodell *Fire Dynamics Simulator* (FDS) betrachtet. Der besondere Fokus liegt dabei auf der Simulation der Heizquelle und den äußeren Randbedingungen, wie zum Beispiel die Anpassung der Umgebungstemperaturen und die thermischen Eigenschaften der verwendeten Baustoffe.

Der Schwerpunkt der Auswertung liegt auf dem Auftriebsstrahl, der sich mittig über der Heizquelle befindet. Die Kriterien, die für die Auswertung betrachtet werden, sind die Form des Strömungsprofils, die Größe der Flächenströme, das Entstehen von Turbulenzeffekten sowie die konvektive Wärmefreisetzung des Heizblocks.

Diese Punkte werden einzeln und im Vergleich mit den Ergebnissen der Experimente behandelt.

1.2 Allgemeines zu PIV und den Experimenten

Die PIV-Methode und das Vorgehen während der Experimente werden hier nur kurz erläutert, da die detaillierte Beschreibung dazu Teil einer weiteren Bachelor Thesis ist, (LEONIE ROMMESWINKEL, 2015).

PIV, ist eine optische Methode zur Messung von Geschwindigkeitsfeldern. Grundsätzlich benötigt man dazu einen Dauerstrich- oder Doppelpuls laser mit hoher Intensität, dazu passend getaktete Kameras sowie ein Fluid aus Partikeln, welches annähernd die gleichen Strömungseigenschaften besitzt wie das zu betrachtende Medium, zum Beispiel Wasser oder Luft.

Für die zu betrachtenden Strömungsexperimente wird ein Doppelpuls laser der Klasse 4 verwendet. Diese Intensität ist notwendig, um später die verwendeten Partikel sichtbar zu machen. Die beiden Strahlen des Lasers müssen exakt übereinander liegen, um am Ende brauchbare Informationen zu erhalten. Da der Laser aus Platzgründen neben dem Versuchsaufbau steht, muss der zusammengeführte Laserstrahl zunächst über mehrere Spiegel an die richtige Position geleitet werden.

Der Versuchsaufbau des Experimentes ist recht einfach gehalten. Den Untergrund des Aufbaus bildet eine Holzplatte, auf der eine Plexiglas-Box mit offenem Boden und einer verschließbaren Öffnung auf der linken Seite steht. In der Mitte der Holzplatte befindet sich auf einer Promatplatte ein Kupferheizblock. Außerdem befinden sich in der hinteren rechten Ecke fünf Thermoelemente. Zum Einspeisen und Absaugen der Partikel befinden sich zwei kleine Öffnungen in der Holzplatte.

Der Laserstrahl wird oberhalb der Plexiglas-Box zu einer Ebene aufgefächert, welche solange ausgerichtet wird bis sie ungefähr in der Mitte des Heizblocks liegt, Abbildung 1.1.

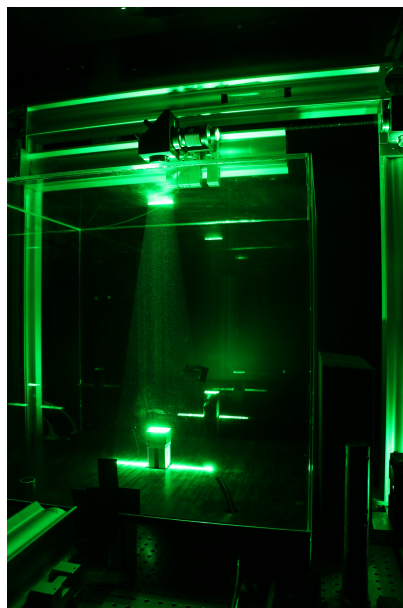


Abbildung 1.1: Versuchsaufbau mit aufgespannter Laserebene

Die beiden für dieses Experiment verwendeten Kameras werden auf diese Ebene ausgerichtet und mit Hilfe eines Targets aufeinander kalibriert. Aus Platzgründen stehen die Kameras sehr nah an dem Versuchsaufbau, sodass nur ein kleiner Teil davon abgebildet werden kann. Um dennoch den vollständigen Aufbau abbilden zu können, sind die Kameras an einem Linux-Profil befestigt und damit in der Höhe verschiebbar. Während die untere Kamera immer an der gleichen Stelle bleibt und somit den Referenzpunkt bildet, wird die obere in der Höhe verschoben. Damit die Verschiebung später genau bestimmt werden kann, wird durch die Öffnung in der Box ein Zollstock in die Laserebene gestellt und ein Bild davon mit beiden Kameras aufgenommen. Nachdem das geschehen ist, werden die Partikel mit Druckluft in den Versuchsaufbau eingebracht. Wenn sich überall im Raum Partikel verteilt haben, werden die Versuche gestartet.

Die Versuche werden für die Heizblocktemperaturen 50°C, 100°C, 150°C, 200°C und 250°C in je fünf verschiedenen Höhen durchgeführt. Der Laser und die Kameras laufen beide mit 10Hz und sind exakt aufeinander abgestimmt. Die Kamera schießt zwei Bilder in einem extrem kurzen Abstand in dem Moment, in dem der jeweilige Laserpuls die Partikel in der aufgespannten Ebene beleuchtet. Der Abstand zwischen den beiden Aufnahmen muss je nach Strömungsgeschwindigkeiten mit Hilfe des Δt -Optimizers angepasst werden.

Mit der Software wird aus den beiden Bildern der zurückgelegte Weg der einzelnen Partikel gemessen. Aus diesem Weg und dem Zeitabstand Δt werden schließlich die Geschwindigkeitsfelder der Strömung berechnet. Die Darstellung dieser Geschwindigkeitsfelder kann sowohl während der Auswertung mit der programmeigenen Software als auch mit externen Programmen geschehen.

Da die Messungen über fünf Höhen aufgenommen werden und die Bilder zunächst zusammengesetzt werden müssen, wird die Auswertung mit Hilfe von Python vorgenommen. Die Auswertung selbst wird in Kapitel 4 beschrieben. Die Daten für diese Auswertung werden während einer fünftägigen Messreihe erzeugt. An den ersten vier Tagen werden je Höhe zunächst alle Temperaturen aufgenommen, bevor die Kamera verschoben wird. Das dient dazu, in den Aufnahmen immer den gleichen Versatz zu haben und somit die Auswertung zu erleichtern. Ein Problem, das dabei auftritt, ist, dass die Bilder nicht exakt aufeinander passen, da die äußeren Randbedingungen, wie zum Beispiel von außen einströmende Wärme oder Kälte, einen Einfluss auf die Strömungen haben.

Am fünften Tag werden daher für die Temperaturen 200°C und 250°C noch einmal alle Höhen in kürzester Zeit aufgenommen, um zumindest für die Auswertung der Turbulenzeffekte gut aufeinander passende Daten zu erhalten.

1.3 Allgemeines zur Simulation mit FDS

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgesetzten Simulationen werden mit dem Brand-simulationsmodell FDS berechnet, welches auf dem Ansatz der *Computational Fluid Dynamics* (CFD) basiert. Die Ergebnisse der Simulationen werden mit dem Visualisierungsprogramm Smokeview dargestellt.

FDS und Smokeview werden in einem Kooperationsprojekt am amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) und im Technical Research Center of Finland (VTT) entwickelt. In dieser Arbeit wird die Version 6.1.2 verwendet. Die erste Version wurde im Februar 2000 veröffentlicht. Seitdem wird das CFD-Modell weltweit von wissenschaftlichen Einrichtungen und in der Praxis von Brandschutzingenieuren zur Untersuchung von Brandereignissen und deren Auswirkungen eingesetzt. Dabei wird es ständig evaluiert und weiterentwickelt.

FDS löst numerisch eine Form der Navier-Stokes-Gleichungen für dreidimensionale, langsame, thermisch angetriebene Strömungen mit dem Schwerpunkt auf Rauch- und Wärmetransport von Bränden. Die Verwendung solcher numerischen Modelle im Brandschutz gewinnt immer mehr an Bedeutung. Brände und die damit verbundene Ausbreitung beispielsweise von Rauch oder thermischer Strahlung können durch komplexe Simulationsprogramme wie FDS simuliert werden. Das führt zu einer individuellen Bewertung des Sicherheitsniveaus von Gebäuden und der daraus resultierenden individuellen Gestaltung der Brandschutzmaßnahmen. Das bietet oftmals große Vorteile gegenüber der bloßen Verwendung von Richtlinien und Verordnungen.

Mit Smokeview können die Auswertungen der Simulationen zwei- oder dreidimensional sowohl als Standbild als auch animiert dargestellt und ausgegeben werden.

2 Simulation

2.1 Aufbau einer Simulation

In diesem Kapitel wird die Simulation des Versuchsaufbaus aus den Experimenten mit FDS beschrieben. Zunächst wird dazu der grobe Versuchsaufbau mit FDS modelliert. Im Weiteren werden den verwendeten Baustoffen entsprechende Materialkennwerte zugewiesen und Beobachtungspunkte und -ebenen hinzugefügt, an denen später die Auswertung stattfindet.

Da es sich bei dem Versuch um Voruntersuchungen handelt, in denen hauptsächlich das Vorgehen und der Umgang mit der Messtechnik analysiert werden sollen, ist der Aufbau wie in Kapitel 1.2 beschrieben relativ einfach gehalten.

Das ganze Modell steht auf einer Holzplatte mit den Abmessungen 76 cm x 60 cm x 4 cm. Da die Partikel des verwendeten Fluids während der PIV Experimente im Versuchsaufbau bleiben sollen, ist dieser mit einer Plexiglas-Box abgedeckt. Diese Plexiglas-Box ist an der Unterseite offen, sodass sie nur an ihren Kanten auf der Holzplatte aufliegt. Die Abmessungen der Grundfläche der Box sind 76 cm x 60 cm und 68 cm in der Höhe. Die Dicke des Plexiglasses beträgt 0,5 cm. In der Mitte der Holzplatte steht auf einer Promatplatte ein Kupfer-Heizblock. Die Promatplatte besitzt die Abmessungen 6 cm x 6 cm x 2 cm, analog dazu sind die Abmessungen des Heizblocks 6 cm x 6 cm x 4 cm. Die Promatplatte ist nur in geringem Maße wärmedurchlässig und dient daher als Schutz für das Holz vor der Hitze des Heizblocks.

Auf Grund des mittels der Plexiglas-Box abgeschlossenen Versuchsaufbaus ist davon auszugehen, dass sich die Luft innerhalb der Box im Laufe der Zeit erwärmen wird. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, werden während der Experimente in einer Ecke der Box mehrere Thermoelemente eingebracht.

Die Simulation wird in einem Textdokument erstellt. Prinzipiell sind dabei ein paar Vorgaben einzuhalten. Jede Zeile, die in die Simulation eingehen soll, muss mit einem „&“ beginnen und mit einem „/“ enden. Alle Maßangaben sind in Meter und es wird grundsätzlich alles groß geschrieben.

Die erste Zeile des Dokumentes beinhaltet den „HEAD“, die Kopfzeile. Sie gibt in der „CHID“ an, welche Bezeichnung die Ausgabedateien erhalten. Die letzte Zeile des Dokuments besteht nur aus dem Wort „TAIL“, was soviel wie Ende bedeutet.

Die Reihenfolge aller anderen Zeilen im Dokument ist für die Ausführung der Simulation generell nicht von Bedeutung. Jedoch gibt es Zeilen, die in der Simulation weiter oben stehen sollten. Die zweite Zeile gibt daher die zu simulierende Echtzeit in Sekunden an. Die dritte Zeile enthält die „MISC“, das steht für „miscellaneous“ und bedeutet Verschiedenes. Es wird beispielsweise der „RESTART“-Parameter definiert. Dieser Parameter steht standardmäßig auf „FALSE“. Wird eine Simulation absichtlich oder aus Versehen unterbrochen, so kann sie durch setzen des Parameters auf „TRUE“ an der Stelle wieder gestartet werden, an der sie beendet wurde und muss nicht komplett neu gestartet werden. Weitere Parameter für die „MISC“ können Eigenschaften für Materialien von Baustoffen sein. In dieser Simulation werden in der „MISC“ noch die „Boundary Files“ ausgeschaltet. „Boundary Files“ zeichnen während der Simulation die verschiedensten Messwerte wie den Wärmestrom oder die Oberflächentemperaturen aller dargestellten Oberflächen von Objekten auf. Sollen wie hier nur einzelne Oberflächen aufgezeichnet werden, werden die „Boundary Files“ zunächst ausgeschaltet, indem in der „MISC“ „BNDF_DEFAULT=.FALSE.“ gesetzt wird. Für die relevanten Oberflächen werden die „BNDF“ wieder einzeln eingeschaltet.

Die vierte Zeile der Simulationsdatei beinhaltet die Gitterauflösung. Diese wird definiert durch die Größe des Simulationsaufbaus, der durch Koordinaten der Form „XB=x1,x2,y1,y2,z1,z2“ bestimmt wird, und die Größe und Anzahl der einzelnen Zellen, die durch die Form „IJK=x,y,z“ bestimmt werden. Die Eingabewerte für die Größe des Aufbaus ergeben sich demnach zu „XB=0.0,0.76, 0.0,0.60, -0.04,0.68“. Bei einer Zellenweite von beispielsweise 2 cm ergibt sich folgende Anzahl an Zellen „IJK=38, 30, 36“. Die z-Koordinaten beginnen hier bei -4 cm, da der Nullpunkt die Oberkante der Holzplatte bzw. die Unterkante der Promatplatte definieren soll. In der nächsten Zeile wird die Art der „BNDF“ definiert, in diesem Fall der Wärmestrom.

Wie oben bereits erwähnt, wird sich die Umgebungsluft in der Plexiglas-Box nach und nach erwärmen. Sowohl bei den Experimenten als auch bei der Simulation ist es von großer Wichtigkeit, dass ein stationärer Zustand erreicht wird, bevor die relevanten Messungen durchgeführt werden können. Nur so können am Ende Experimente und Simulationen qualitativ miteinander verglichen werden. Während der Experimente dauert diese „Einschwingphase“ zwischen 15 und 20 Minuten. Da diese Zeit unmöglich in einem angemessenen Rahmen simuliert werden kann, weil die Simulationszeiten viel zu viel Zeit in Anspruch nehmen würde, werden zu Beginn der Simulation schon verschiedene Temperaturzonen definiert. Diese Temperaturzonen werden in den Zeilen sechs bis elf auf Grundlage der sich aus den Experimenten ergebenden Temperaturmessungen erstellt. Es werden mit Hilfe der initialen Eigenschaften, der „INIT“, insgesamt sechs Zonen definiert. Die Größe der Zonen wird so gewählt, dass sie sich nicht überschneiden und sich der jeweilige Referenzpunkt aus den Experimenten in der Mitte befindet. Durch diese vordefinierten Temperaturzonen wird die Einschwingphase in der Simulation erheblich verringert.

Der weitere Aufbau des Dokumentes ist optional, jedoch wird zur Übersicht

eine gewisse logische Struktur beibehalten. Die nächsten Zeilen des Dokuments beschreiben daher zunächst den Versuchsaufbau. Die Zeilen beginnend mit „OBST“ für „Obstruction“, beschreiben ein Hindernis, das bedeutet die Wände der Plexiglas-Box, die Holzplatte, die Promatplatte und den Heizblock. Ebenso wie bei der Gitterauflösung werden die Hindernisse in Koordinaten der Form „XB=x1,x2,y1,y2,z1,z2“ beschrieben. So wird beispielsweise für die vordere Wand der Box folgendes geschrieben:

```
„&OBST XB=0.0,0.76, 0.0,0.02, 0.0,0.66 /“.
```

Die Dicke der Wand wird dabei auf 2 cm gesetzt, da zunächst im 2cm-Raster gerechnet wird. Den Koordinaten des jeweiligen Hindernisses bzw. Bauteils folgt noch die „SURF_ID“. Diese „Surface Identification“ weist dem jeweiligen Bauteil eine entsprechende Oberfläche bzw. ein Material zu, wie zum Beispiel „SURF_ID='Glaswand'“. Dem Aufbau der Box folgt die Definition des zugewiesenen Materials, in diesem Beispiel Plexiglas. Die Zeile beginnt mit „&MATL“, es folgen die Identifikation „ID“, die Wärmeleitfähigkeit „CONDUCTIVITY“ in $[W/m\ K]$, die Dichte „DENSITY“ in $[kg/m^3]$ und die spezifische Wärme „SPECIFIC_HEAT“ in $[kJ/kg/K]$. Die Materialzeile für Plexiglas wird demnach wie folgt geschrieben:

```
„&MATL ID='GLAS', CONDUCTIVITY=0.19, DENSITY=1190, SPECIFIC_HEAT=1.42 /“.
```

Damit FDS erkennt, dass das eben definierte Material zu der Glaswand gehört, wird es der „SURF ID 'Glaswand'“ zugeordnet, zusammen mit ein paar weiteren Faktoren wie der tatsächlichen Dicke des Bauteils, der Farbe und gegebenenfalls einem Transparenzfaktor. Damit ergibt sich für das Eingabedokument:

```
„&SURF ID='GLASWAND', MATL_ID='GLAS', THICKNESS=0.005, COLOR='WHITE', TRANSPARENCY=0.3 /“.
```

Auf diese Weise werden neben der Plexiglas-Box auch die Holzplatte und die Promatplatte definiert. Für den Heizblock werden zunächst nur die Koordinaten angegeben. Die „SURF_ID“ wird auf „INERT“ gesetzt. Das bedeutet, dass die Eigenschaften des Materials des Heizblocks nicht mit in die Simulation eingehen. Diese Einstellung erfolgt, da der Befehl, Wärme abzugeben, separat definiert wird. Dazu wird eine Wärmequelle auf die selben Koordinaten wie der Heizblock gesetzt. An dieser Stelle werden auch die „BNDF“ wieder eingeschaltet, um die Wärme-freisetzung des Heizblocks aufzuzeichnen. Dazu wird „BNDF_OBST=.TRUE.“ gesetzt. Die Oberfläche der Wärmequelle beinhaltet zum einen die Information über die abzugebende Temperatur und zum anderen noch eine Farbe, in der die Wärmequelle später dargestellt werden soll. Die Zeile der Wärmequelle für 200°C sieht also folgendermaßen aus:

```
„&SURF ID='HOT', TMP_FRONT=200, RGB=100,0,0 /“.
```

Mit dem Erstellen der Wärmequelle ist der Aufbau des Versuches abgeschlossen, Abbildung 2.1. Es folgt die Definition der Beobachtungspunkte und -ebenen. Es wird unterschieden in „Slice Files“ („SLCF“) und „Devices“ („DEVC“). Die „SLCF“ sind Ebenen, die während der Simulation verschiedenste Messwerte der

Umgebungsluft aufzeichnen und diese später in Smokeview graphisch darstellen. Beispielsweise kann der Verlauf von Temperaturen oder Strömungsgeschwindigkeiten in der entsprechenden Ebene dargestellt werden. Die Darstellung kann flächig oder in Form von Vektoren erfolgen. Die Zeile zur Definition eines „SLCF“ kann wie folgt aussehen:

```
„&SLCF PBX=0.31, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /“.
```

„PBX“ beschreibt eine x-z-Ebene. Analog dazu beschreibt „PBZ“ eine y-z-Ebene und „PBZ“ eine x-y-Ebene. Die „QUANTITY“ definiert die darzustellenden Parameter, hier die Strömungsgeschwindigkeit. Als Letztes wird angegeben, ob die Daten als Vektoren dargestellt werden sollen oder nicht. Sollen Vektoren dargestellt werden, wird der Faktor auf „.TRUE.“ gesetzt. Andernfalls kann dieser Teil weggelassen werden oder er wird auf „.FALSE.“ gesetzt.

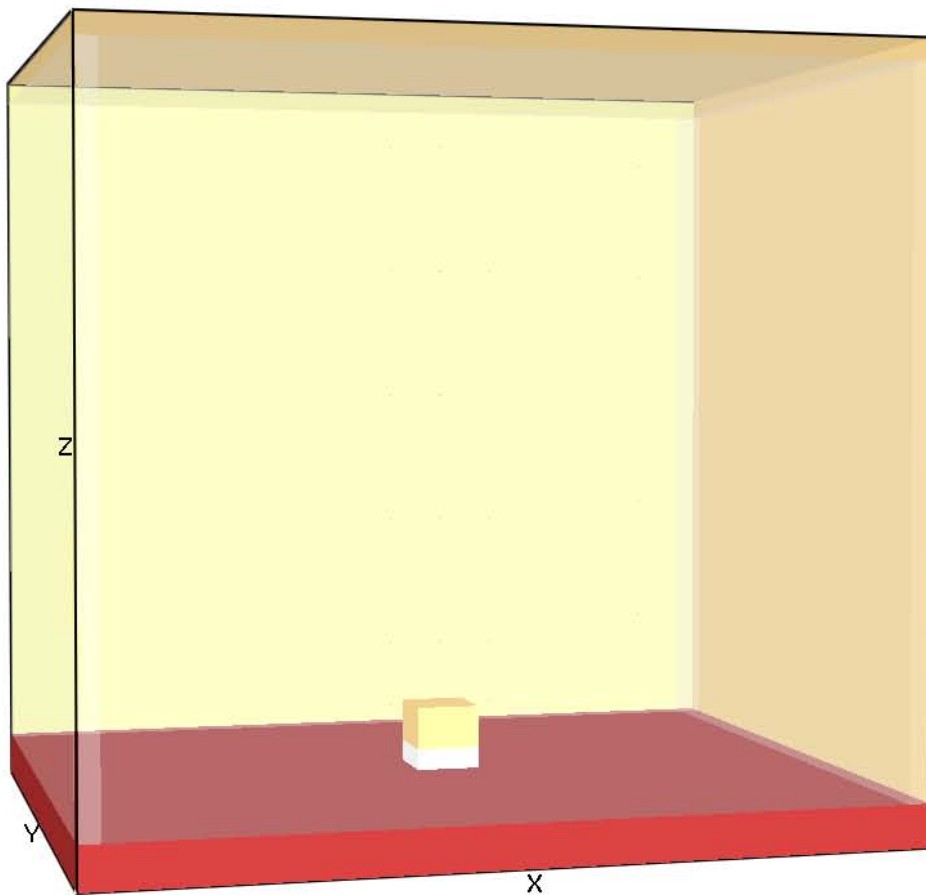


Abbildung 2.1: Modellaufbau der Simulation

Die „Devices“ sind gemittelte Werte an Punkten oder in Ebenen, die während der Simulation in einer gesonderten Datei ausgeschrieben werden.

```
&DEVC ID='12' XB=0.30,0.48, 0.22,0.42, 0.12,0.12, QUANTITY='VOLUME FLOW' /.
```

Diese Zeile beschreibt eine Ebene mit den angegebenen Koordinaten, die, wie bereits von den „OBST“ bekannt, die Form „XB=x1,x2,y1,y2,z1,z2“

besitzen. Soll keine Ebene sondern nur ein Punkt ausgegeben werden, wird statt „XB=x1,x2,y1,y2,z1,z2“ „XYZ=x,y,z“ geschrieben. Die „ID“ beschreibt den Namen der Ausgabedateien. Die „QUANTITY“ gibt wie in den „SLCF“ die auszugebenden Parameter an. Zusätzlich zu den Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten werden in dieser Simulation Volumen- und Wärmeströme ausgegeben.

Insgesamt werden zur Temperaturmessung und -darstellung sechs „SLCF“ als x-y-Ebene in verschiedenen Höhen erstellt, zwei als x-z-Ebene und zwei als y-z-Ebene. Dazu kommen 23 „DEVC“ an vier verschiedenen x-y-Punkten in insgesamt sechs verschiedenen Höhen. Zur Messung der Geschwindigkeiten wird je ein „SLCF“ als x-z- und einer als y-z-Ebene sowie sechs „DEVC“ als x-y-Punkt in der Mitte des Heizblocks in sechs verschiedenen Höhen erstellt. Zusätzlich werden zwölf „DEVC“ als x-y-Ebenen in sechs verschiedenen Höhen über dem Heizblock erstellt, davon je sechs als Volumenstrom und sechs als Wärmestrom.

Sind alle „Slice Files“ und „Devices“ geschrieben ist die Eingabedatei für die Simulation fertig. Eine vollständige und kommentierte Fassung im 2 cm-Raster liegt dem Anhang bei.

2.2 Gitterstudie

2.2.1 Hintergrund

Jede Simulation mit FDS findet in mindestens einem virtuellen Raum statt, welcher in viele kleine Zellen unterteilt ist, sodass sich ein Raumgitter ergibt. Während der Simulation werden für jede dieser Zellen zeitabhängige physikalische Parameter berechnet, in den hier betrachteten Simulationen hauptsächlich Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten. Die Auflösung des Raumgitters hat einen starken Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse der Simulationen. Ein sehr grob gewähltes Gitter kann beispielsweise Turbulenzeffekte in Strömungen nicht qualitativ darstellen. Um solche Effekte darstellen zu können, muss die Auflösung entsprechend detailliert sein und eine Vielzahl kleiner Zellen enthalten. Zu beachten ist jedoch, dass eine kleinere detailliertere Abbildung des Raumgitters auch Einfluss auf die Rechenzeit hat. Je kleiner das Gitter ist, desto größer wird die Rechenzeit. Daher ist es wichtig eine Gitterstudie durchzuführen.

Bei einer Gitterstudie wird die gleiche Simulation mit unterschiedlichen Gitterauflösungen gerechnet. Anschließend werden die relevanten Ausgabedaten miteinander verglichen. Am einfachsten geschieht dies durch graphische Darstellung der Ergebnisse in Diagrammen. In den erstellten Diagrammen lässt sich ablesen zu welchem Zeitpunkt ein feineres Gitter keinen Einfluss mehr auf die Ergebnisse hat. Wählt man beispielsweise eine Zellengröße von 2 cm und verringert sie um die Hälfte auf 1 cm und die Graphen der jeweiligen Daten würden aufeinander laufen, so wäre es ausreichend mit dem 2 cm-Raster zu rechnen.

Ist der zu berechnende Raum sehr groß, der eigentlich relevante Bereich für die Ausgabedaten im Vergleich dazu jedoch relativ klein, so bietet es sich an, unterschiedliche Bereiche mit verschiedenen Gitterauflösungen zu berechnen. Dabei ist zu beachten, dass an der Grenze zur nächst kleineren Auflösung das Verhältnis der Zellengrößen nicht größer als 2:1 sein sollte.

2.2.2 Durchführung und Ergebnisse

Die Gitterstudie beginnt damit, mehrere Simulationen mit verschiedenen Temperaturen der Heizquelle aufzusetzen. In den Experimenten, deren Daten die Grundlage für die Simulationen bilden, werden Temperaturen von 50°C bis 250°C in 50er Schritten realisiert. Dementsprechend werden zunächst fünf Simulationen mit verschiedenen Temperaturen aufgesetzt. Für jede Temperatur werden dann insgesamt drei Simulationen mit den Gitterauflösungen 2 cm, 1 cm und 0,5 cm aufgesetzt.

Die berechneten Daten für Temperaturen und Geschwindigkeiten, sowie Volumen- und Wärmeströme werden graphisch dargestellt und verglichen.

Für die Auswertung besonders interessant sind dabei die Daten direkt im Plume oberhalb der Heizquelle und unmittelbar daneben. Für die automatisierte graphische

Darstellung wird mit Hilfe von Python ein kleines Programm geschrieben, welches die Ausgabedaten der Simulationen automatisch einliest, sortiert und in einem oder mehreren Diagrammen darstellt. Das entsprechende Skript liegt in kommentierter Fassung dem Anhang bei.

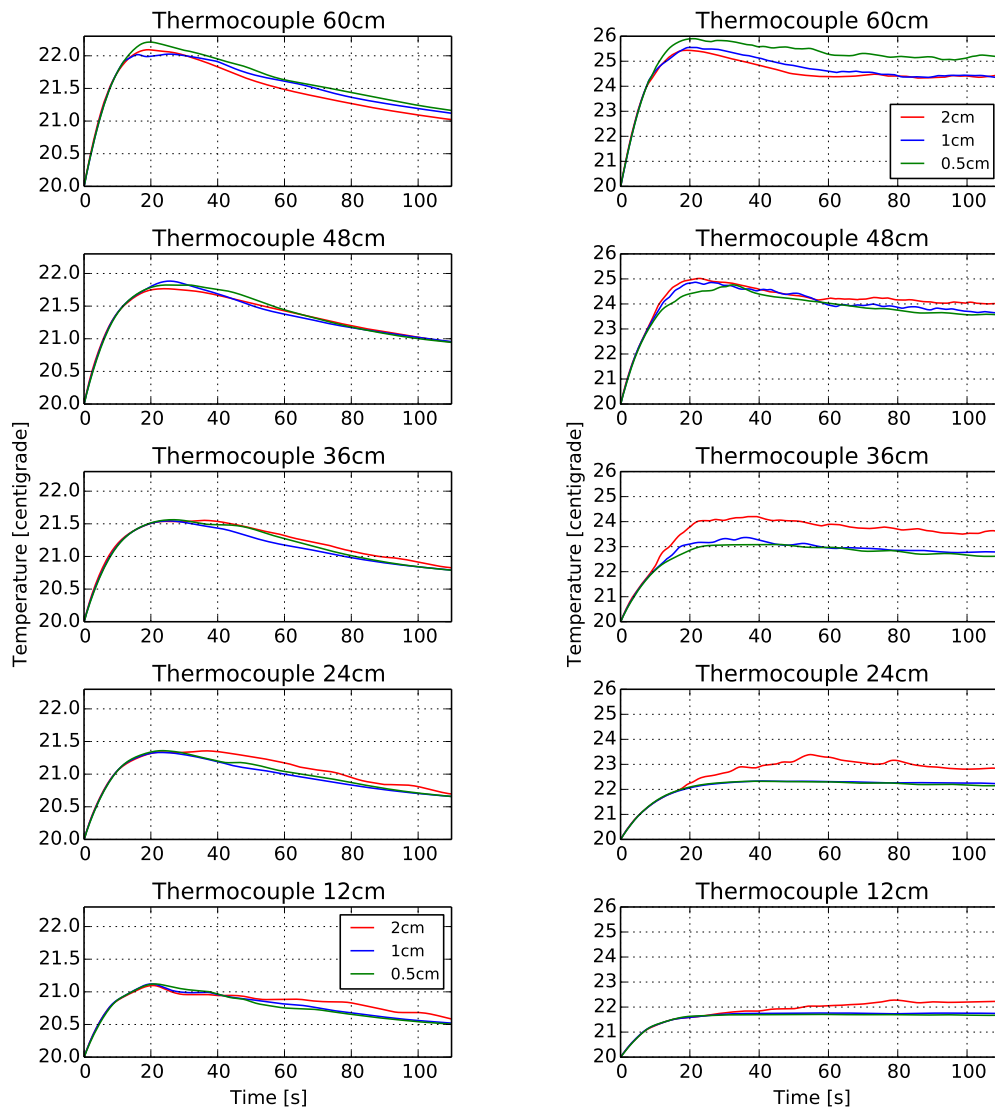


Abbildung 2.2: Gitterstudie Temperaturmessung bei 50°C (links) und 200°C (rechts)

Mit Hilfe der erstellten Diagramme wird schnell ersichtlich, dass die Wahl für die Auflösung des Raumgitters sehr stark von den simulierten Temperaturen und den zu untersuchenden Parametern abhängt. Für die Messung der Temperaturen im Versuchsaufbau bei 50°C Heizblocktemperatur sind die Werte aller drei untersuchten Gitterauflösungen nahezu identisch. Bei 100°C bis 250°C fällt das 2 cm-Raster raus, da sich die Werte um bis zu 1,5°C von den anderen Gitterauflösungen unterscheiden. Die Kurven des 1 cm- und 0,5 cm-Rasters weisen dagegen in den meisten Fällen fast

identische Werte auf. Lediglich in der obersten Höhe weichen die Daten etwas stärker voneinander ab, Abbildung 2.2.

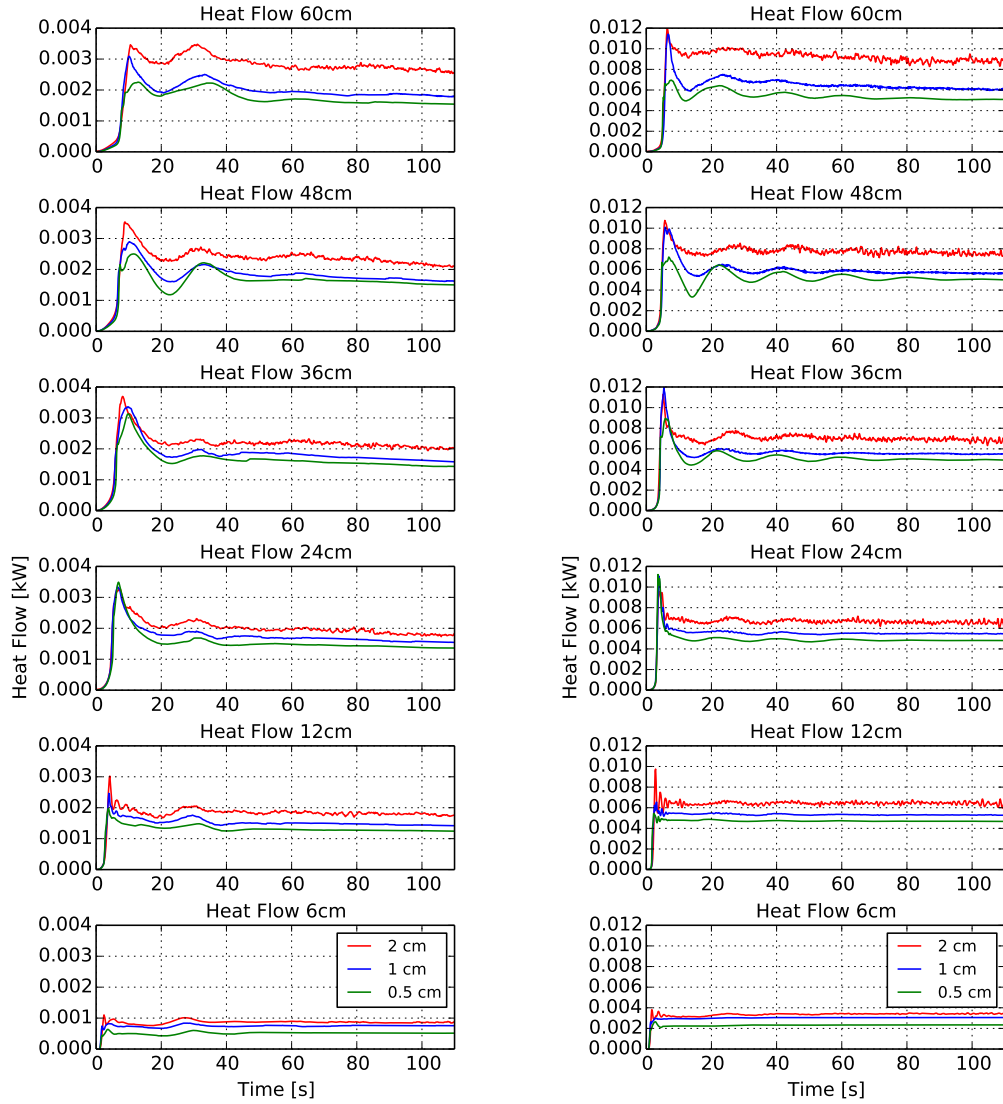


Abbildung 2.3: Gitterstudie Wärmestrom bei 50°C (links) und 100°C (rechts)

Die Abbildung 2.3 zeigt den Wärmestrom für 50°C und 100°C. Die Kurven des 2 cm- und des 1 cm-Rasters liegen dabei weit von einander entfernt, sodass eine Berechnung mit dem 2 cm-Raster ausscheidet. Die Werte des 1 cm- und des 0,5 cm-Rasters liegen dagegen sehr nahe aneinander. Das Gleiche trifft auf die Daten des Volumenstroms zu. Auch in den Kurven der Geschwindigkeiten mittig über dem Heizblock aus Abbildung 2.4 liegt das 1 cm- und das 0,5 cm-Raster besonders in den unteren Höhen sehr nah aneinander. In den oberen Höhen wird der Abstand nur minimal größer.

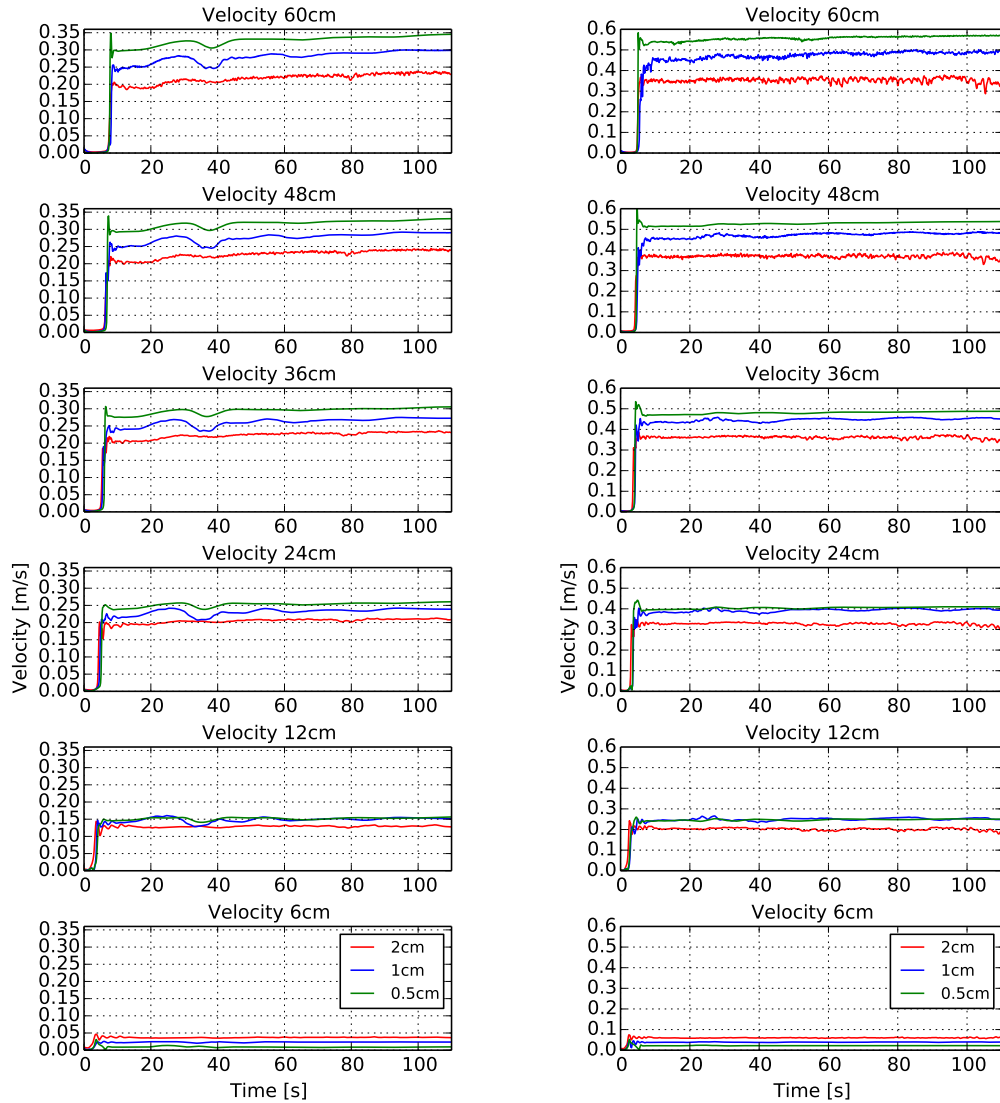


Abbildung 2.4: Gitterstudie Geschwindigkeiten bei 50°C (links) und 100°C (rechts)

Grund für die eng aneinander laufenden Kurven der niedrigen Heizblocktemperaturen sind die geringen Strömungsgeschwindigkeiten und das Fehlen von Turbulenzeffekten. Für diese glatten laminaren Strömungen würde demnach das größere 1 cm-Raster ausreichen, um besonders im Plume qualitative Ergebnisse zu erhalten. Je größer die Temperaturen werden, desto größer werden die Strömungsgeschwindigkeiten und desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Turbulenzeffekten. Bereits bei 150°C treten bei der feinsten Gitterauflösung im Bereich des Plumes Unregelmäßigkeiten im Wärme- und Volumenstrom sowie den Geschwindigkeiten in der Plumemittelachse auf, die im 1 cm-Raster nicht zu sehen sind. Bei 200°C und 250°C treten diese Unregelmäßigkeiten immer häufiger und nicht nur in der obersten Höhe auf, Abbildung 2.5. Es entstehen zunehmend mehr Turbulenzeffekte, die in den größeren Gitterauflösungen durch eine zu starke Glättung der

Werte nicht mehr dargestellt werden können. Ein 1 cm-Raster wäre demnach nicht mehr ausreichend.

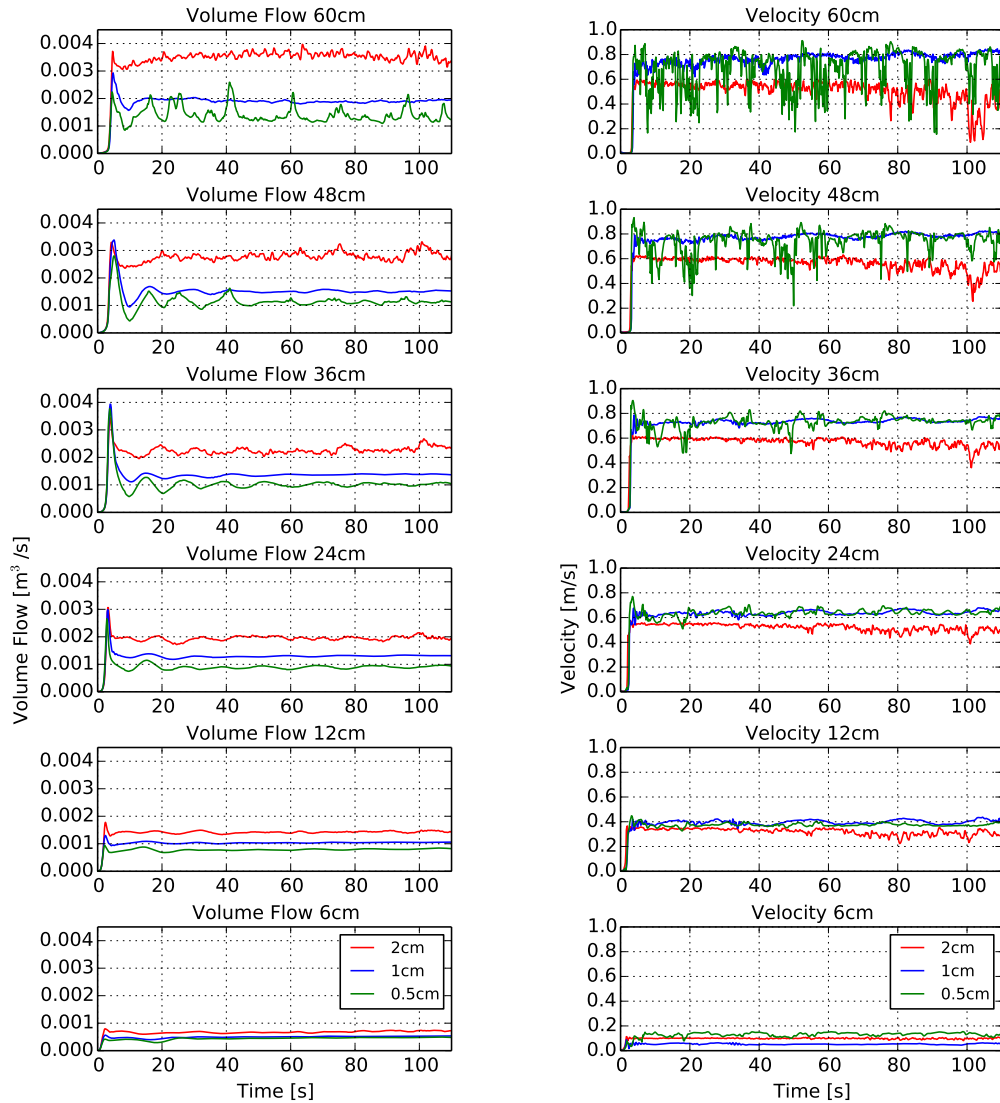


Abbildung 2.5: Gitterstudie Volumenstrom bei 200°C und Geschwindigkeit bei 250°C

Zusätzlich zu den Unregelmäßigkeiten in den erstellten Grafiken werden die Unterschiede der Gitterauflösungen auch in der Darstellung mit Smokeview deutlich. Während im 1 cm- und 2 cm-Raster überhaupt keine sichtbaren Turbulenzen entstehen, bilden sich im 0,5 cm-Raster deutlich erkennbare Turbulenzen aus, siehe Kapitel 3.4.

Damit sie am Ende qualitativ verglichen werden können, müssen die Simulationen für die verschiedenen Temperaturen den gleichen Randbedingungen unterliegen. Aus diesem Grund wird das Raumgitter mit einer Zellengröße von 0,5 cm simuliert. Weitere erzeugte und zum Vergleich verwendete Diagramme befinden sich im Anhang.

2.3 Sensitivitätsanalyse

2.3.1 Anfangstemperaturen

Der Versuchsaufbau der Experimente bildet mit der Plexiglas-Box einen geschlossenen Raum. Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, ist davon auszugehen, dass sich die Temperatur der Umgebungsluft in der Box mit der Zeit aufheizen wird. Dieser Effekt wird während der Experimente durch dauerhafte Temperaturmessungen über fünf verschiedene Höhen in einer Ecke der Box genaustens beobachtet und aufgezeichnet. Die Experimente werden nach jeder Erhöhung der Heizblocktemperatur erst dann durchgeführt, wenn die Temperaturen der Umgebungsluft einen stationären Zustand erreicht haben und nicht weiter ansteigen. Dieser stationäre Zustand tritt jedoch erst nach einer Einschwingphase von 15 bis 20 Minuten ein, Kapitel 2.1.

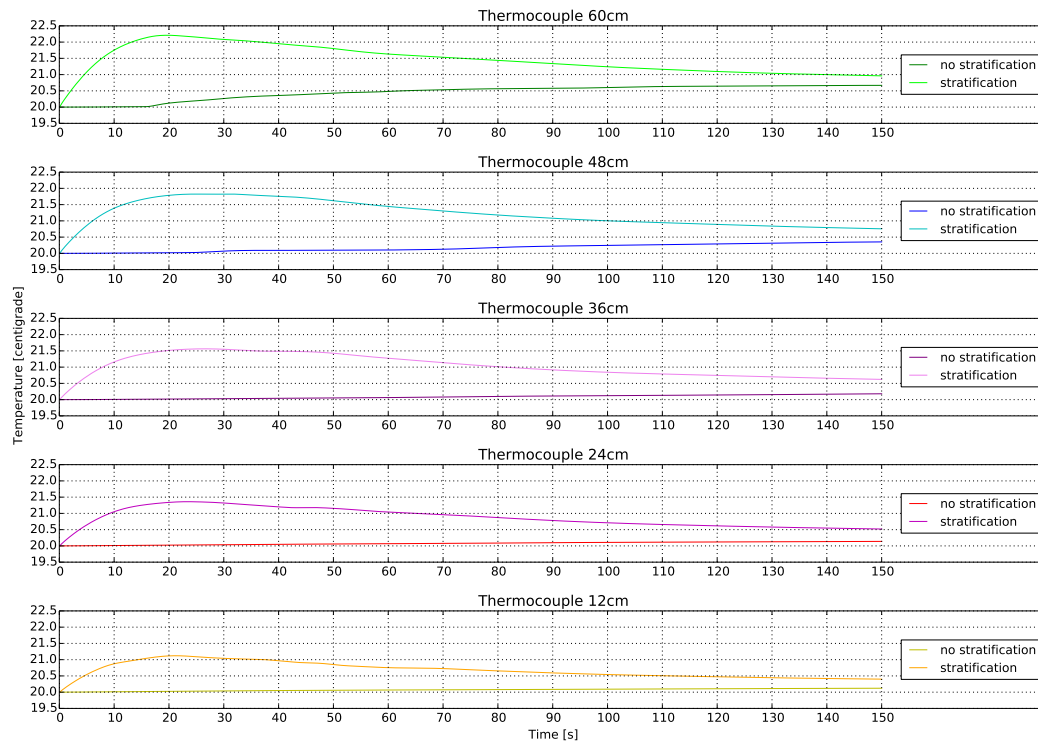


Abbildung 2.6: Umgebungstemperaturen bei 50°C

In diesem Kapitel werden nun zwei verschiedene Simulationen für jede Heizblocktemperatur verglichen. Für die erste Simulation beträgt die Anfangstemperatur in der Box konstant 20°C und für die zweite werden verschiedene Temperaturzonen auf der Grundlage der Temperaturmessungen aus den Experimenten voreingestellt. Simuliert wird eine Zeitspanne von 150 Sekunden, also 2,5 Minuten. Für beide Simulationen wird geprüft, ob sich im Gegensatz zu den Experimenten nach einer so kurzen Zeit bereits ein stationärer Zustand einstellt. Zusätzlich wird untersucht, ob,

und wenn ja, zu welchem Zeitpunkt die Temperaturen der beiden Simulationen in etwa identisch bzw. gleich den Temperaturen aus den Experimenten sind. Für die Untersuchung werden die Ergebnisse der Simulationen wieder mit Hilfe von Python graphisch in Diagrammen dargestellt und verglichen. In den Abbildungen 2.6 und 2.7 ist gut zu erkennen, dass der stationäre Zustand mit steigender Temperatur des Heizblocks zunehmend schneller eintritt. Für die höheren Temperaturen, hier am Beispiel 250°C , ist an den Messpunkten in den Höhen 48 cm und 60 cm außerdem zu erkennen, dass sich die Temperaturkurven mit und ohne vorherige Temperaturschichtung schon nach ca. 100 Sekunden stark annähern, berühren und einen stationären Zustand erreichen. An dem Messpunkt in der Höhe von 36 cm berühren sich die beiden Kurven erst nach ungefähr 130 Sekunden. Je niedriger der Messpunkt liegt, desto größer wird der Abstand zwischen den beiden Kurven. Bei den niedrigeren Heizblocktemperaturen berühren sich die Kurven in keiner der Messpunkthöhen. Jedoch ist klar zu erkennen, dass sich bei jeder Temperaturkurve des vorgeschichteten Modells bei ungefähr 120 Sekunden ein stationärer Zustand einstellt. Für die Simulationen folgt daraus, dass eine voreingestellte Temperaturschichtung durchaus sinnvoll ist, um die Einschwingphase zu verkürzen.

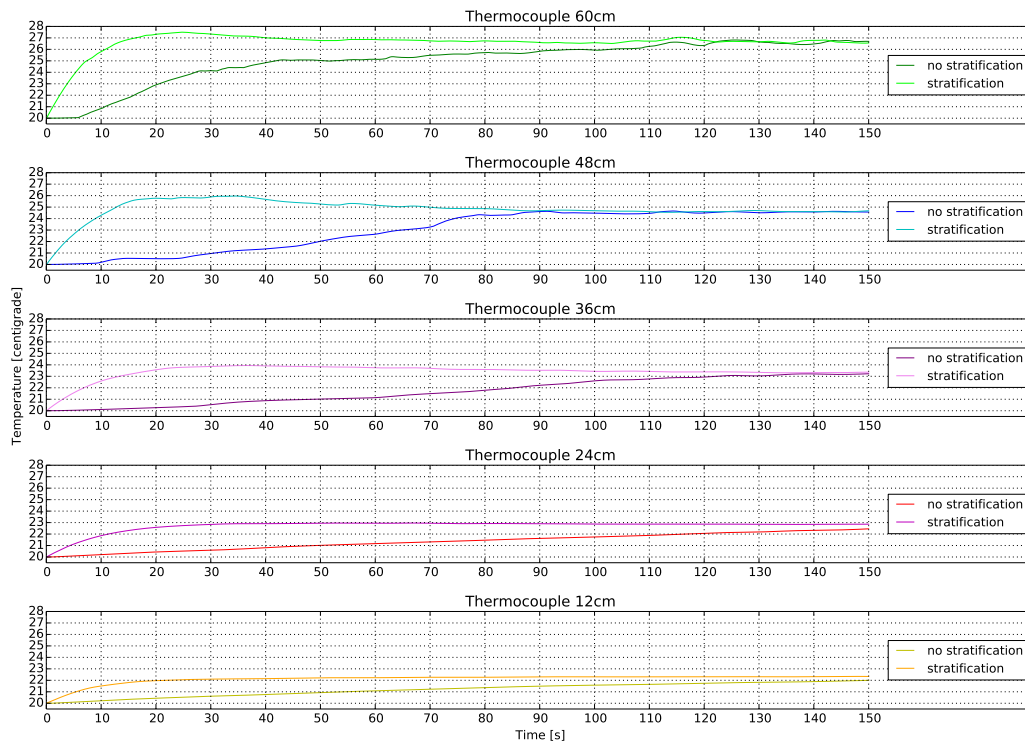


Abbildung 2.7: Umgebungstemperaturen bei 250°C

Es bleibt die Frage, ob die nach der Einschwingphase erreichten, stationären Temperaturen denen der Experimente gleichen. Die Tabellen 2.1 bis 2.5 zeigen die Temperaturen der Messpunkte während der Experimente und Simulationen. In der letzten Spalte der Tabellen ist jeweils die Differenz zwischen den Temperaturen aus den

Experimenten und den Simulationen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperaturdifferenz, bis auf wenige Ausnahmen, größer wird, je höher der Messpunkt liegt und desto größer die Heizblocktemperatur wird.

Höhe [cm]	Temperatur Exp. [°C]	Temperatur Simu. [°C]	Differenz [°C]
12	21,6	20,4	1,1
24	21,9	20,5	1,4
36	22,1	20,6	1,5
48	22,5	20,7	1,8
60	23,1	20,9	2,2

Tabelle 2.1: Temperaturen der Messpunkte für 50°C im Vergleich

Höhe [cm]	Temperatur Exp. [°C]	Temperatur Simu. [°C]	Differenz [°C]
12	21,6	20,7	0,9
24	21,7	20,9	0,8
36	22,6	21,1	1,5
48	23,4	21,5	1,9
60	24,4	22,2	2,2

Tabelle 2.2: Temperaturen der Messpunkte für 100°C im Vergleich

Höhe [cm]	Temperatur Exp. [°C]	Temperatur Simu. [°C]	Differenz [°C]
12	21,9	21,1	0,8
24	22,2	21,4	0,8
36	22,8	21,8	1,0
48	24,5	22,5	2,0
60	26,1	23,7	2,4

Tabelle 2.3: Temperaturen der Messpunkte für 150°C im Vergleich

Höhe [cm]	Temperatur Exp. [°C]	Temperatur Simu. [°C]	Differenz [°C]
12	22,2	21,7	0,5
24	22,6	22,1	0,5
36	23,6	22,5	1,1
48	26,1	23,5	2,6
60	28,1	25,1	3,0

Tabelle 2.4: Temperaturen der Messpunkte für 200°C im Vergleich

Die Temperaturen aus den Simulationen sind dabei immer geringer als die der Experimente. Die größte Abweichung tritt bei 250°C in 60 cm Höhe auf und beträgt 3,7°C. Die kleinste Temperaturdifferenz tritt ebenfalls bei 250°C in der Höhe von 24 cm auf und fällt damit etwas aus der Reihe.

Generell weichen die Temperaturen der Simulationen sehr stark von denen der Experimente ab. Das kann daran liegen, dass die Umgebungstemperaturen bei den

Höhe [cm]	Temperatur Exp. [°C]	Temperatur Simu. [°C]	Differenz [°C]
12	22,5	22,3	1,2
24	23,1	22,9	0,2
36	24,5	23,4	1,1
48	27,5	24,7	2,8
60	30,3	26,6	3,7

Tabelle 2.5: Temperaturen der Messpunkte für 250°C im Vergleich

Experimenten außerhalb des Versuchsaufbaus starken Schwankungen unterliegen, die in der Simulation nicht betrachtet werden.

Abbildung 2.8 zeigt, wie sich die Temperaturen bei 250°C während der Simulation nach 25 Minuten verändern. Auch nach einer so langen Zeit liegen die Temperaturen der Simulationen noch deutlich unter denen der Experimente.

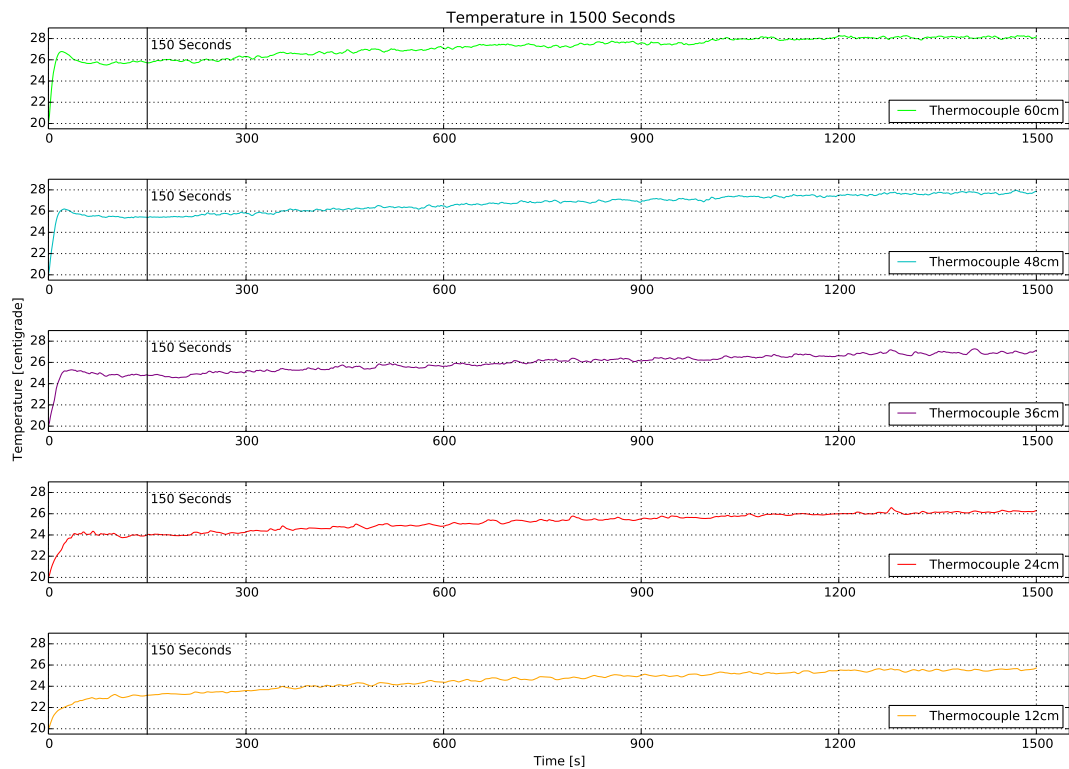


Abbildung 2.8: Umgebungs Temperaturen nach 25 Minuten

Für die endgültigen Simulationen wird für die Einschwingphase dennoch eine Zeitspanne von nur 150 Sekunden festgesetzt. Zu diesem Zeitpunkt erreichen die Temperaturen das erste Mal einen annähernd stationären Zustand. Die Temperaturen steigen dann zwar irgendwann wieder etwas an, jedoch ist dieser Anstieg auf die zeitliche Dauer gesehen eher gering. Der relevante Anstieg und die Verteilung der Temperaturen erfolgen innerhalb der ersten 150 Sekunden.

Die endgültigen Simulationen werden mit 200 Sekunden angesetzt, da erst nach der

Einschwingphase die eigentlichen Messungen erfolgen. Diese sollen für die niedrigen Temperaturen und für den Vergleich mit den Experimenten 10 Sekunden betragen. Zur Betrachtung der Turbulenzeffekte ist ein längerer Zeitraum von bis zu 50 Sekunden vorgesehen.

2.3.2 Heizquelle

Das wohl wichtigste Element der durchgeführten Experimente und der Simulationen ist der Heizblock. Eine technische Zeichnung liegt dem Anhang bei. Der Heizblock besteht aus einem Kupferblock mit den Abmessungen 6 cm x 6 cm x 4 cm. Auf der hinteren Seite des Blocks befindet sich ein schmales Loch, in das eine elektrische Spannung angelegt wird, welche den Block während der Experimente aufheizt. Die gewünschte Temperatur kann dabei an einem Regler bis auf 1°C genau eingestellt werden. Ein Problem, das hierbei auftritt, besteht darin, dass die eingestellte Temperatur nicht gleich der tatsächlich erreichten Temperatur des Heizblocks ist. Zudem wird bei den ersten Experimenten ein unregelmäßiger Temperaturverlauf entlang des Heizblocks vermutet. Diese Vermutung rührt daher, dass das Strömungsbild auf der einen Seite größere Geschwindigkeiten aufweist als auf der anderen.

Damit die Daten der Simulation mit denen der Experimente qualitativ verglichen werden können, muss zum einen festgestellt werden wie groß die Differenz zwischen eingestellter und tatsächlicher Temperatur ist. Zum anderen müssen die Unregelmäßigkeiten in der Beheizung ermittelt werden.

Um die entsprechenden Informationen zu erhalten, werden von dem Heizblock Thermographieaufnahmen gemacht. Kurz vor der Durchführung der experimentellen Messreihe wird der Heizblock noch einmal neu gebaut. Er ist vor dem Neubau etwas kleiner und besitzt eine Vertiefung auf der Oberseite, damit verschiedene Stoffe darauf verdampfen können. Diese Vertiefung fällt bei dem neuen Heizblock weg. Auch der unregelmäßige Temperaturverlauf ist in den neuen Strömungsbildern nicht mehr zu erkennen. Da zum Zeitpunkt der Simulationsdurchführung nur Thermographieaufnahmen für den alten Heizblock im Temperaturbereich von 50°C bis 150°C bestehen, wird die Annahme getroffen, dass der Heizblock nun regelmäßig beheizt wird. Zudem wird mit den alten Temperaturdifferenzen gerechnet und eine Annahme für die fehlenden Temperaturen getroffen.

Bei einer eingestellten Temperatur von 50°C wird am Heizblock eine tatsächliche Temperatur von 50°C gemessen. Für 100°C werden dagegen nur noch 97,7°C gemessen. Die Differenz beträgt damit 2,3°C. Bei eingestellten 150°C werden noch 145,2°C gemessen. Die Differenz beträgt also bereits 4,8°C. Wenn davon auszugehen ist, dass sich die Temperaturdifferenz ungefähr linear vergrößert, können die fehlenden tatsächlichen Temperaturen ganz einfach durch eine kleine Formel berechnet werden:

Die Differenz bei 50°C beträgt 0°C, bei 100°C beträgt sie 2,3°C. Die Differenz der

beiden Differenzen beträgt also ebenfalls 2,3°C. Die Differenz bei 150°C beträgt 4,8°C die Differenz zu 2,3°C beträgt damit 2,5°C und ist um 0,2°C gestiegen. Die Differenz d der eingestellten Temperatur ab 100°C zur tatsächlichen Temperatur lässt sich damit wie folgt berechnen:

$$d_{(i)} = d_{(i-1)} + 2,3 + 0,2 * i \text{ [°C]}$$

Wobei i die Nummer der Temperaturmessungen ohne 50°C ist.

Tabelle 2.6 zeigt alle eingestellten Temperaturen, die berechnete Differenz und die daraus folgenden angenommenen tatsächlichen Temperaturen des Heizblocks. Diese angenommenen Temperaturen bilden die Eingabewerte für die Heizquelle in den Simulationen.

Nr.	(i)	Temp. eingestellt [°C]	Differenz d [°C]	Temp. tatsächlich [°C]
1	-	50	0	50
2	0	100	2,3	97,7
3	1	150	4,8	145,2
4	2	200	7,5	192,5
5	3	250	10,4	239,6

Tabelle 2.6: Annahme Temperaturen Heizblock

Die neuen Thermographieaufnahmen, die einige Zeit nach der Simulationsdurchführung aufgenommen wurden, ergaben, dass die Annahme nicht richtig war. Tabelle 2.7 zeigt die Annahmen für die tatsächliche Temperatur, die neu aufgenommene tatsächliche Temperatur sowie ihre Differenz. Allerdings ist dazu zu sagen, dass für die Thermographieaufnahmen der Heizblock erneut umgebaut wurde und somit nicht mehr wirklich als Vergleichsmöglichkeit herangezogen werden kann.

Während der Experimente gibt es für die angelegte Spannung im Heizblock nur den Zustand an oder aus. Das bedeutet, dass nur solange geheizt wird bis die Temperatur erreicht ist. Danach fließt kein Strom mehr bis die Temperatur wieder fällt. Dadurch entstehen die Differenzen in der eingestellten und der tatsächlichen Temperatur.

Nr.	Eingest. [°C]	Diff. d [°C]	Annahme [°C]	Tatsächlich [°C]	Diff. D [°C]
1	50	0	50	49,0	-0,09
2	100	2,3	97,7	104,1	6,4
3	150	4,8	145,2	152,8	7,6
4	200	7,5	192,5	202,2	9,7
5	250	10,4	239,6	252,0	12,4

Tabelle 2.7: Temperaturen Heizblock neu

Nach dem Umbau kann eine Spannung definiert werden, die den Block konstant aufheizt und auf der gewünschten Temperatur hält. Nach dieser Methode wäre keine nennenswerte Anpassung der Heizblocktemperaturen für die Simulationen notwendig gewesen.

3 Auswertung Simulation

3.1 Allgemeines

Mit den Ergebnissen der Gitterstudie und der Sensitivitätsanalyse werden nun die endgültigen Simulationen aufgesetzt und gestartet. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden zunächst einzeln ausgewertet und dann für die Vergleiche mit den Experimenten genutzt. Damit ein Vergleich stattfinden kann, werden für die Auswertung der Simulationen die gleichen Parameter betrachtet wie für die Experimente.

In den Experimenten wird nur eine x-z-Ebene in der Mitte des Heizblocks studiert. Daher wird auch aus den Simulationen hauptsächlich diese Ebene betrachtet. Es werden zunächst die gesamten Strömungsprofile des Auftriebsstrahls untersucht. Aus den Strömungsprofilen werden dann an bestimmten Stellen die Strömungsgeschwindigkeiten in z-Richtung betrachtet. Anschließend werden die daraus resultierenden Volumen- bzw. Flächenströme berechnet. Als letzter Punkt werden die Turbulenzeffekte betrachtet. Hier wird verglichen, ob die Turbulenzen in den Experimenten und Simulationen in etwa zum selben Zeitpunkt auftreten und die gleichen Ausmaße haben. Dazu wird über die Plumemittelachse die Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung berechnet und ausgewertet.

3.2 Strömungsprofile

Für die Auswertung der Simulationen müssen zunächst mit Hilfe des „fds2ascii“-Tools die Daten der Strömungsprofile aus Smokeview exportiert werden. Da in der Auswertung der Experimente gemittelte Daten über 10 Sekunden betrachtet werden, werden auch aus Smokeview gemittelte Daten über 10 Sekunden ausgegeben. Der Ausgabezeitraum dafür ergibt sich aus Kapitel 2.3.1 zu 150 s bis 160 s. Des Weiteren wird in den Experimenten in x-Richtung nur ein etwa 10 cm großer Ausschnitt betrachtet, bei dem der Heizblock genau mittig liegt. Für die Simulationen wird daher neben einem Gesamtbild auch ein ebenfalls ca. 10 cm großer Ausschnitt ausgegeben. Die exportierten Daten werden mit Hilfe von Python entsprechend aufbereitet und graphisch dargestellt.

Die Ausgabedatei aus FDS enthält sechs Spalten. Die ersten beiden geben die x- und

z-Koordinaten an, die restlichen vier Spalten enthalten die Geschwindigkeitskomponenten „u“, „v“ und „w“ sowie ihre Resultierende. Mit Python wird ein Programm geschrieben, welches die Daten automatisch einliest, die Daten aus den Spalten jeweils einem „Array“ mit entsprechender Bezeichnung zuweist und anschließend daraus ein farblich dargestelltes Strömungsprofil aus Vektoren, wie in Abbildung 3.1, erstellt und ausgibt. Der kommentierte Python Code dazu liegt dem Anhang bei.

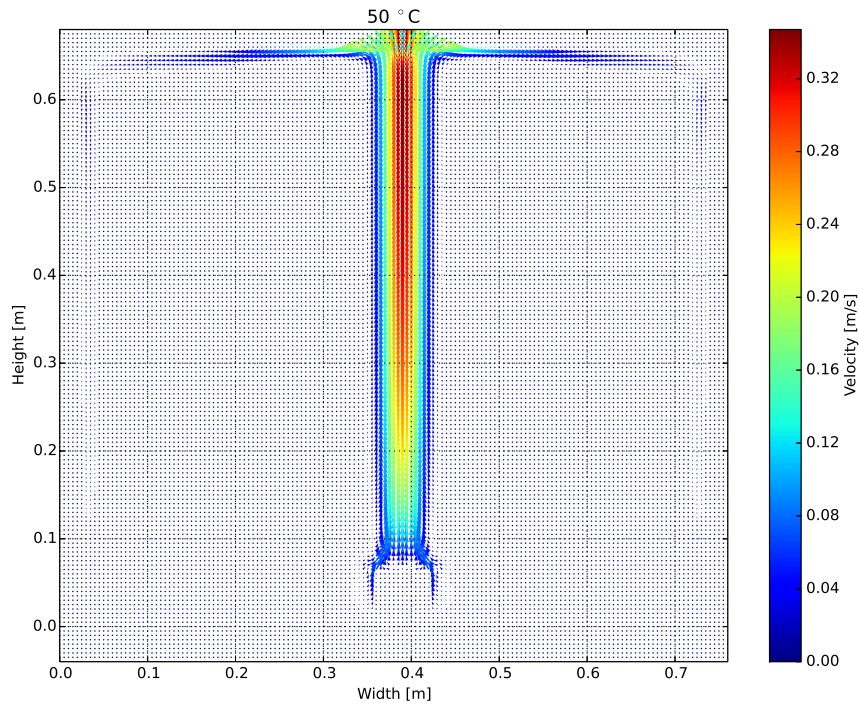


Abbildung 3.1: Strömungsprofil bei 50°C

Die Strömungsprofile von 50°C und 100°C gleichen sich sehr stark. Der Auftriebsstrahl ist regelmäßig und zur Mittelachse des Heizblocks nahezu symmetrisch. Die Strömungsgeschwindigkeiten werden von 50°C zu 100°C um etwa 0.2 m/s größer, die Breite des Plumes bleibt dabei jedoch ungefähr gleich groß, siehe Kapitel 3.3.

Bei 150°C ist bereits eine Aufweitung des Plumes zu sehen. Da es sich um gemittelte Bilder handelt, kann diese Aufweitung bereits das Auftreten kleinerer Unregelmäßigkeiten, wie zum Beispiel Wirbel, bedeuten. Die Geschwindigkeiten steigen dabei im Vergleich zu 100°C nur minimal an. Außerdem ist zu beobachten, dass sich der Plume im Gesamten zwar mittig über dem Heizblock befindet, sich links jedoch Geschwindigkeiten einstellen, die um etwa 0,1 m/s größer sind als rechts. Auch das kann eine Auswirkung von kleineren Wirbeln sein, da diese eine höhere Strömung zur Seite aufweisen und damit die Gesamtgeschwindigkeit nach oben drosseln. Der Plume von 200°C weist ungefähr den gleichen Strömungsverlauf auf, wie der Plume von 150°C. Die Geschwindigkeiten werden jedoch um gut 0,1 m/s schneller. Die Differenz des schnelleren Strömungsverlaufs auf der linken Seite zu dem langsameren auf der rechten wird dabei ebenfalls größer.

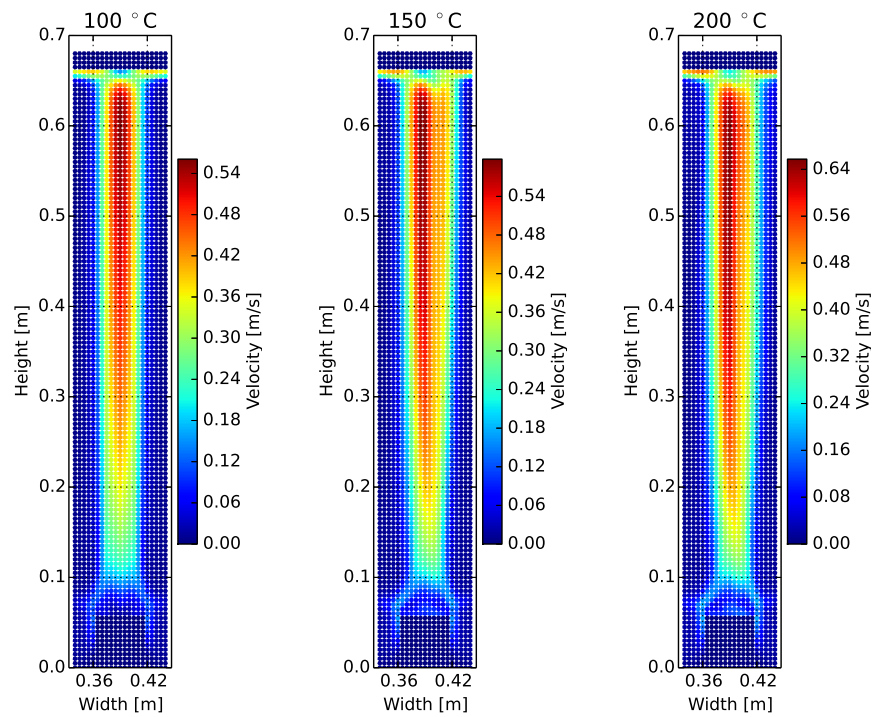


Abbildung 3.2: Strömungsprofil bei 100°C, 150°C und 200°C

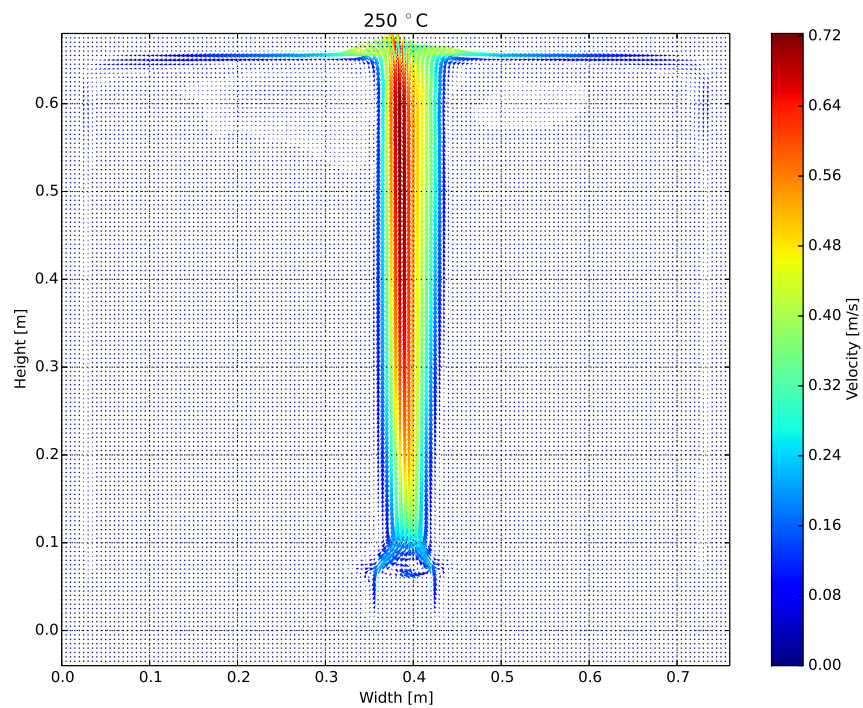


Abbildung 3.3: Strömungsprofil bei 250°C

Der Plume von 250°C zeigt den unregelmäßigen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten am deutlichsten. Der schnellere Teil des Auftriebsstrahls ist leicht nach links geneigt und besitzt mittlerweile eine Geschwindigkeit von gut 0,72 m/s. Rechts werden die Geschwindigkeiten um fast die Hälfte geringer und die Aufweitung des Plumes noch größer, sodass der Auftriebsstrahl generell weiter nach rechts reicht als nach links. Die Untersuchung der Aufweitung des Plumes mit Abnahme der Geschwindigkeiten folgt im Kapitel über die Turbulenzen 3.4. Dort werden Einzelbilder betrachtet, um einen besseren Einblick in das Strömungsverhalten zu erlangen.

3.3 Geschwindigkeitskomponente „w“ und Flächenströme

In diesem Abschnitt wird die Geschwindigkeitskomponente „w“ in verschiedenen Höhen des Plumes untersucht. Die Höhen sind dabei von den Experimenten vorgegeben und ergeben sich jeweils aus der Mitte der Einzelbilder. Da der Versatz der Bilder nicht immer identisch ist, müssen die Höhen zunächst berechnet und angepasst werden, um für die Auswertung der Simulationsdaten genutzt werden zu können. Die Tabelle 3.1 zeigt die ermittelten Höhen für die Experimente und die Simulationen.

Höhe Nr.	Experiment [mm]	Simulation [mm]
1	115,5	150
2	229,5	265
3	348,5	385
4	467,5	505
5	516,5	550

Tabelle 3.1: Höhen zur Auswertung der Geschwindigkeitskomponente „w“

Für die Auswertung selbst wird mit Hilfe von Python ein Programm geschrieben, welches aus den Strömungsprofilen in den gegebenen Höhen die entsprechenden Daten heraus liest und als Kurve in einem Diagramm darstellt. Zusätzlich wird das Integral der Kurve berechnet. Dieses Integral gibt die Größe des Flächenstroms an und dient somit als gute Vergleichsmöglichkeit mit den Experimenten. Das entsprechende Python-Skript befindet sich im Anhang.

Die Abbildungen 3.4 bis 3.8 zeigen den Verlauf der Geschwindigkeit in z-Richtung und den dazu gehörigen Flächenstrom unter jeder Kurve für die verschiedenen Heizblocktemperaturen. Zur besseren Orientierung mit den Höhen befindet sich neben dem Diagramm für die Geschwindigkeitskomponente das Strömungsbild des Plumes.

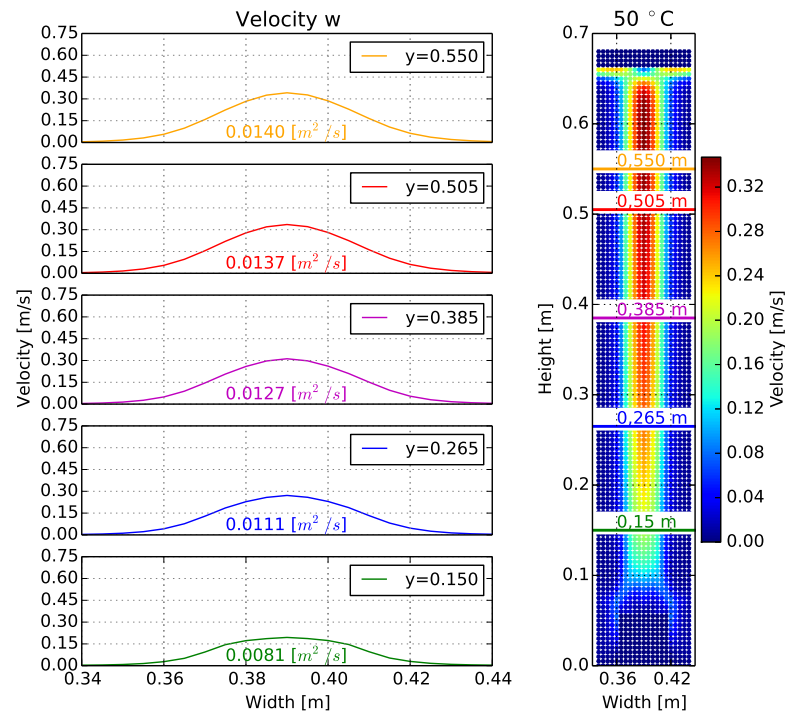


Abbildung 3.4: z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 50°C

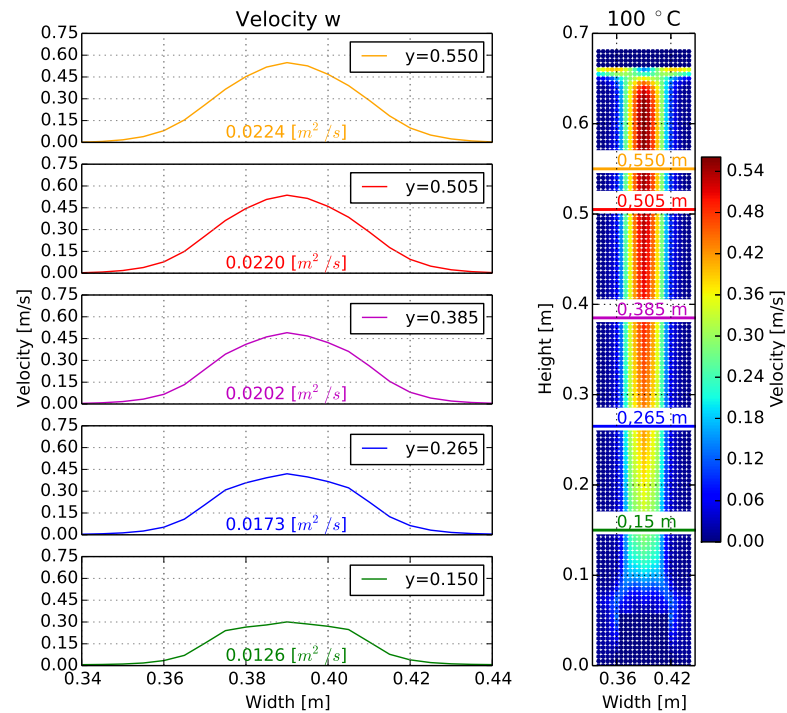


Abbildung 3.5: z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 100°C

Wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben sehen sich der Plume von 50°C und 100°C sehr ähnlich. Auch in den Kurven der Geschwindigkeitskomponente „w“

zeigt sich diese Ähnlichkeit. Die Kurven beider Temperaturen weisen, wie auch die Strömungsbilder, einen gleichmäßigen Verlauf auf, der von der Mittelachse des Heizblocks aus gesehen nahezu symmetrisch ist. Anders als vielleicht zu erwarten, finden sich die höchsten Geschwindigkeiten nicht an dem Heizblock, welcher den Antrieb der Auftriebsströmung darstellt. Die maximalen Geschwindigkeiten der ausgewählten Höhen treten tatsächlich relativ weit oben im Plume in 0,55 m Höhe auf. Von der ersten bis zu letzten Höhe verdoppeln sich die Geschwindigkeiten nahezu.

Die Kurven von 50°C und 100°C unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Größe. Die Größe lässt sich dabei zum einen an der maximalen Geschwindigkeit und zum anderen am maximalen Flächenstrom, dem Integral der Kurve, ablesen. Die Kurven von 100°C sind dabei mit einer maximalen Geschwindigkeit von ungefähr 0,55 m/s und einem maximalen Flächenstrom von 0,0224 m²/s um etwa ein Drittel größer als die von 50°C, mit einer maximalen Geschwindigkeit von nur etwa 0,34 m/s und einem maximalen Flächenstrom von 0,014 m²/s.

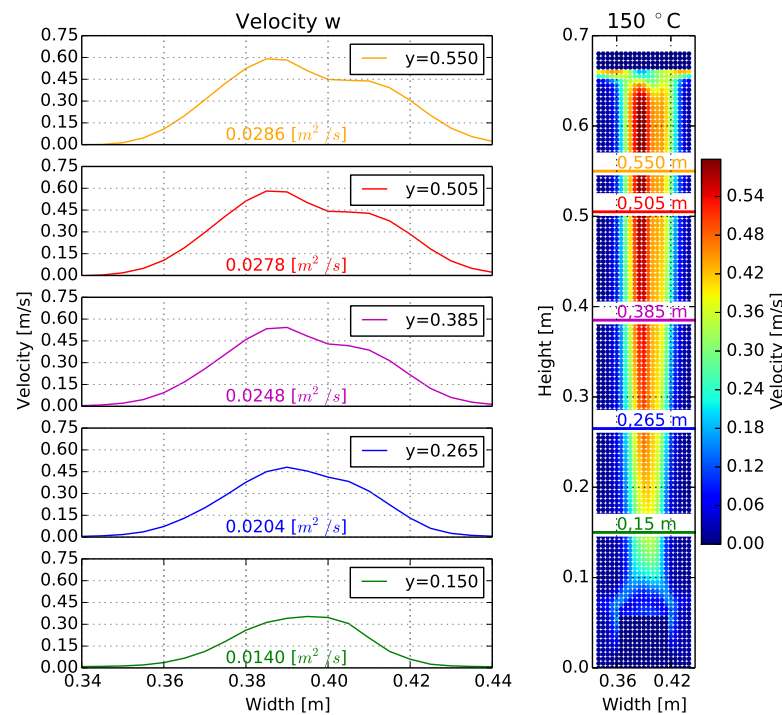


Abbildung 3.6: z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 150°C

In den Kurven der Geschwindigkeitskomponente „w“ von 150°C ist die in Abschnitt 3.2 beschriebene Aufweitung des Plumes ebenfalls gut zu erkennen. Im Gegensatz zu den Geschwindigkeitskurven von 50°C und 100°C ist der Plume nicht mehr ungefähr achsensymmetrisch.

In den niedrigeren Höhen von 0,15 m und 0,265 m ist die Kurve noch relativ gleichmäßig. Es ist jedoch schon eine kleine Aufweitung auf der rechten Seite zu erkennen.

Ab der Höhe von 0,385 m bildet sich diese Aufweitung weiter aus. Die Geschwindigkeiten sind dabei jedoch geringer als die maximal auftretenden Geschwindigkeiten in der entsprechenden Höhe. Von links an betrachtet steigt die Kurve zunächst bis auf den Maximalwert an, fällt dann ein bisschen ab, bleibt ein längeres Stück konstant und fällt dann wieder ab, sodass es so aussieht, als würde sich ein zweiter, langsamerer Auftriebsstrahl neben dem schnelleren bilden.

Die Geschwindigkeiten steigen mit einer maximalen Geschwindigkeit von etwa 0,60 m/s, im Vergleich zu 100°C, um nur ca. 0,05 m/s an. Das entspricht etwa einem Zwölftel. Der Flächenstrom nimmt im Gegensatz dazu um einiges mehr zu, jedoch nicht mehr als ein Viertel. Der maximale Flächenstrom beträgt hier 0,0286 m²/s.

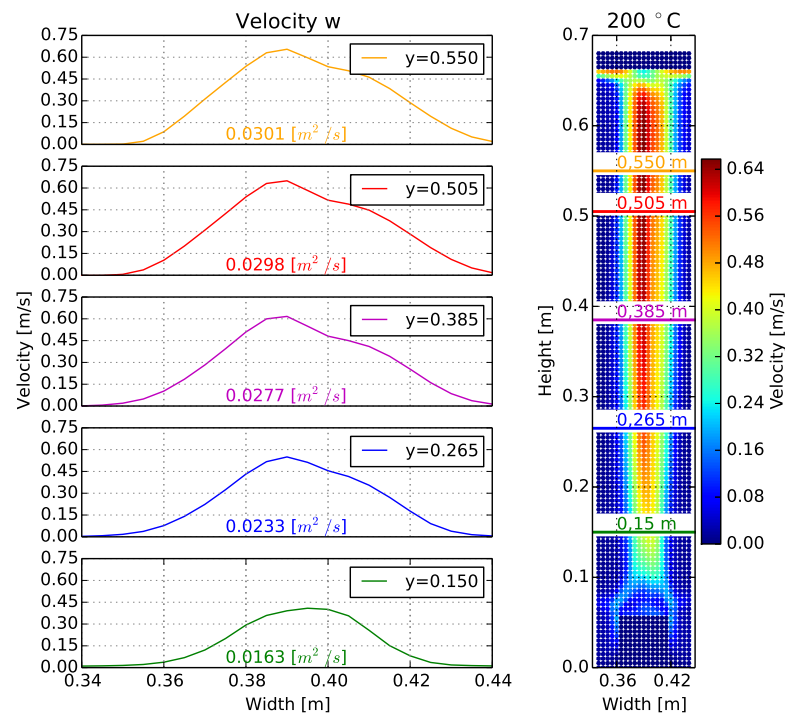


Abbildung 3.7: z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 200°C

Bei 200°C ist der Verlauf der Kurven wieder etwas glatter. Von der Abstufung der Geschwindigkeit zu einem zweiten Auftriebsstrahl ist nur noch wenig zu sehen. Die Aufweitung auf der rechten Seite ist jedoch immer noch vorhanden. Auf der linken Seite steigen die Geschwindigkeiten ungefähr ab 0,35 m auf der x-Achse fast linear bis zur Mittelachse bei 0,39 m an. Danach fallen sie nach rechts wieder ab. Der Verlauf weist jedoch eine kleine Welle auf und ist lange nicht so steil wie auf der linken Seite, sodass der Nullpunkt erst wieder bei 0,44 m erreicht ist. Die Kurve der untersten Höhe ist als einzige wieder nahezu achsensymmetrisch, wobei sie auch nach rechts verschoben ist. Sie steigt weiter als bis zur Mittelachse an und fällt dann etwas steiler, aber ohne Welle wieder ab. Die Geschwindigkeiten und die Flächenströme sind dabei insgesamt kaum größer als die von 150°C.

Die Kurven der unteren drei Höhen von 250°C haben wieder einen gleichmäßigen

Verlauf. Die Kurve der untersten Höhe ist wie bei 200°C leicht nach rechts gewandert und fällt als einzige auf der rechten Seite schneller ab als sie links ansteigt. Die zweite Höhe von unten verläuft fast wieder wie bei 50°C. Der einzige Unterschied ist, dass sie auf der rechten Seite minimal flacher abfällt. Im Gegensatz zu der Kurve der ersten Höhe, wo der Wert der maximalen Geschwindigkeit nach rechts gewandert ist, ist in der Kurve der dritten Höhe der Wert etwas nach links gewandert. Die Aufweitung zur rechten Seite ist jedoch geblieben. Ansonsten ist der Verlauf ähnlich dem der Kurve aus der zweiten Höhe, mit dem kleinen Unterschied einer minimalen Welle beim Abstieg auf der rechten Seite. Die maximalen Geschwindigkeitswerte der oberen beiden Kurven sind ebenfalls leicht nach links gewandert. Die Aufweitung und eine etwas stärker ausgeprägte Welle auf der rechten Seite bleiben jedoch auch hier erhalten. Die maximale Geschwindigkeit und der maximale Flächenstrom steigen dabei wieder nur gering an.

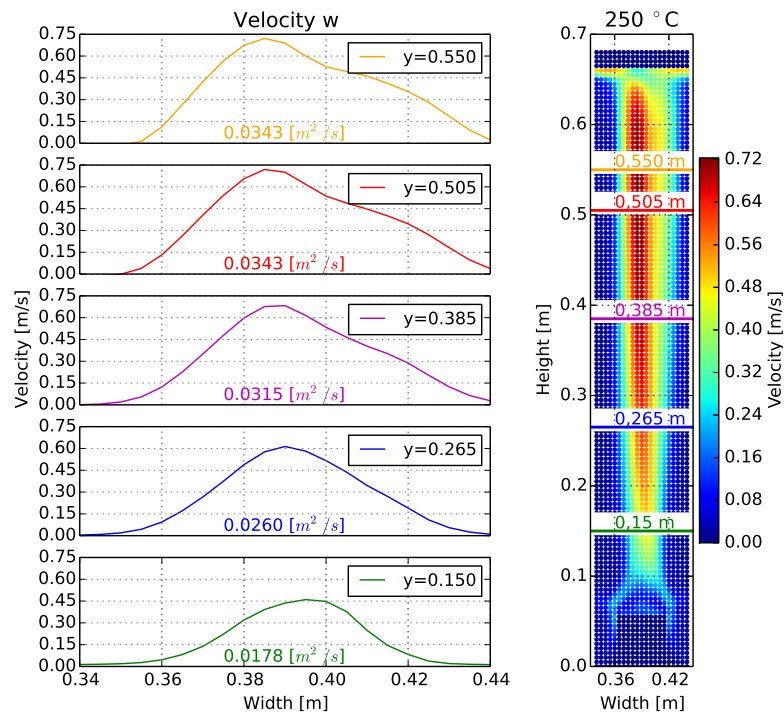


Abbildung 3.8: z-Geschwindigkeit mit Flächenstrom bei 250°C

3.4 Turbulenzen

3.4.1 Allgemeines

Für die Untersuchung zur Entstehung von Turbulenzeffekten werden die Simulationen der Heizblocktemperaturen von 200°C und 250°C näher betrachtet. Dazu werden zum einen die dynamischen Strömungsbilder in Smokeview über 50 Sekunden betrachtet, zum anderen wird entlang der Plumemittelachse die Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente „u“, also in x-Richtung, über alle Zeitschritte einer Messung von zehn Sekunden ermittelt und ausgewertet.

Turbulenzeffekte beschreiben das unregelmäßige Verhalten einer Strömung zum Beispiel durch das Auftreten von Wirbeln oder die Bildung eines Doppelstrahls. Eine Strömung kann auch mit dem Auftreten solcher Turbulenzeffekte noch laminar sein. Von einer turbulenten Strömung ist zu sprechen, wenn die Strömung dauerhaft unregelmäßig ist.

3.4.2 Turbulenzeffekte

Für die Beobachtung der Turbulenzeffekte in Smokeview gibt es zwei Darstellungsmöglichkeiten der dynamischen Strömungsbilder. Zum einen ist die Darstellung als Vektorfelder möglich, zum anderen gibt es die einfache farbige Darstellung.

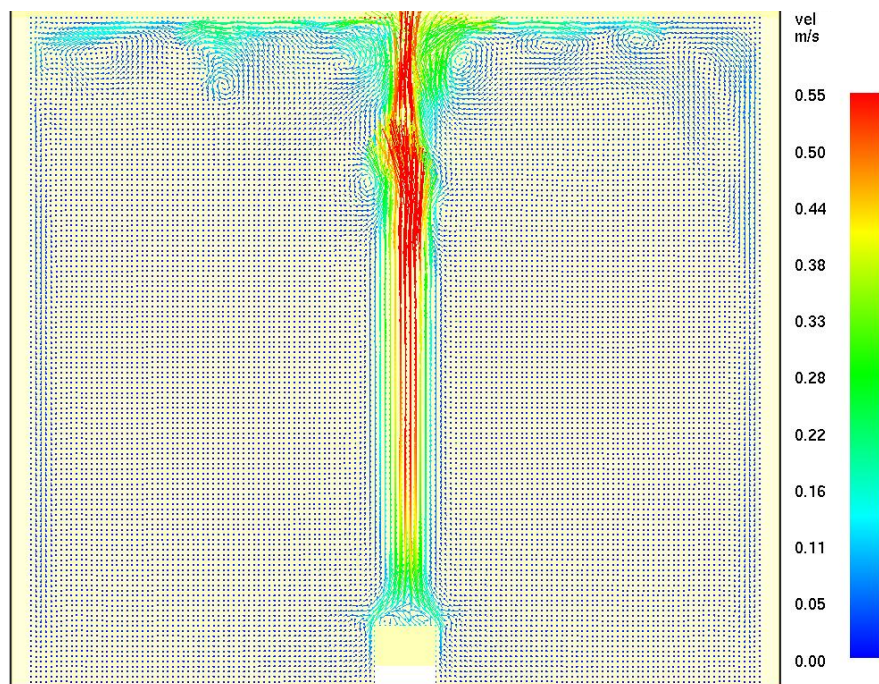


Abbildung 3.9: Wirbel bei 200°C

In den Vektorfeldern wird die Richtung der Strömung und ihre Geschwindigkeit durch unterschiedlich große und farbige Vektoren dargestellt. In der farbigen Darstellung wird lediglich die Geschwindigkeit und der grobe Verlauf der Strömung dargestellt. Die genaue Richtung ist auf Einzelbildern eher nicht zu erkennen. Zur Untersuchung des Auftretens eines Doppelstrahls reicht die einfache farbige Darstellung aus. Für die Beobachtung und Untersuchung von Wirbeln ist jedoch die Darstellung der Vektorfelder von Vorteil, da dort die Richtung und Struktur klar zu erkennen ist.

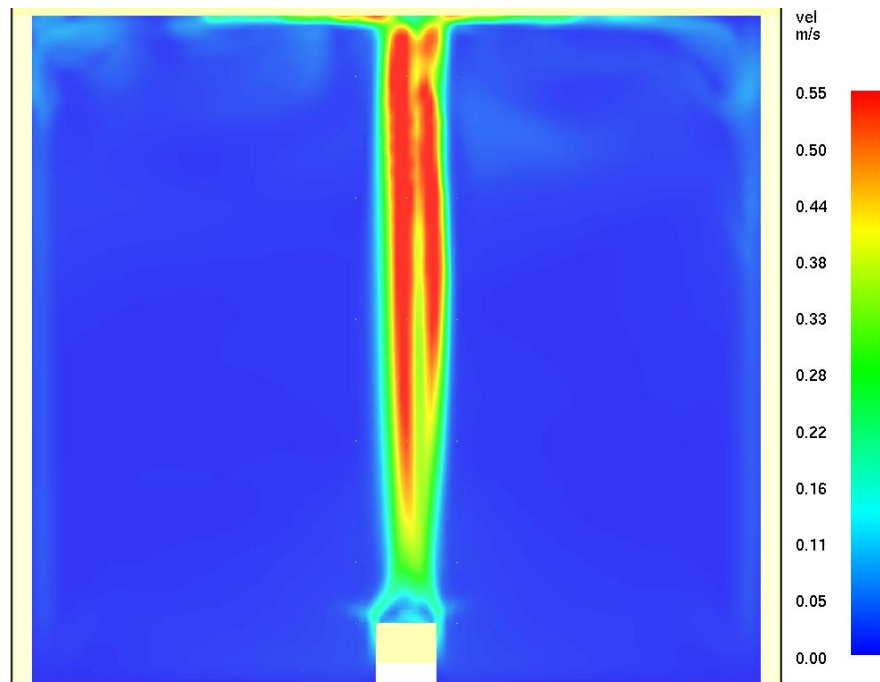


Abbildung 3.10: Doppelstrahl bei 200°C

Die meisten Wirbel entstehen generell an der Decke der Plexiglas-Box, da der Auftriebsstrahl dort plötzlich nach links und rechts ausweichen muss. Bei der Strömung von 200°C treten Verwirbelungen in freier Höhe nur vereinzelt auf. Ein Doppelstrahl wie in Abbildung 3.10 tritt dafür häufiger auf. Vom Heizblock aus teilt sich der Auftriebsstrahl bis zur Decke, als würde einen Reißverschluss geöffnet. Dabei wird der ganze Plume nach rechts aufgeweitet, siehe Kapitel 3.3. So geteilt bleibt der Strahl nur wenige Sekunden dann verschwindet der abgespaltene Teil wieder vom Heizblock aus noch oben. Dieser Effekt tritt meist öfter hintereinander auf. Bei der Entstehung von Wirbeln scheint der Auftriebsstrahl in der farbigen Darstellung leicht zu flackern. Erst bei näherem Hinsehen in der Darstellung der Vektorfelder sind die kleinen Wirbel, wie in Abbildung 3.9, gut zu sehen.

Bei 250°C treten Verwirbelungen öfter auf als noch bei 200°C, Abbildung 3.11. Die Wirbel werden dabei zahlen- und flächenmäßig immer größer. Zudem treten sie auf der z-Achse gut 5 cm bis 10 cm weiter unten auf als bei 200°C. Der Doppelstrahl wie in Abbildung 3.12 tritt bei 250°C dafür seltener auf als bei 200°C.

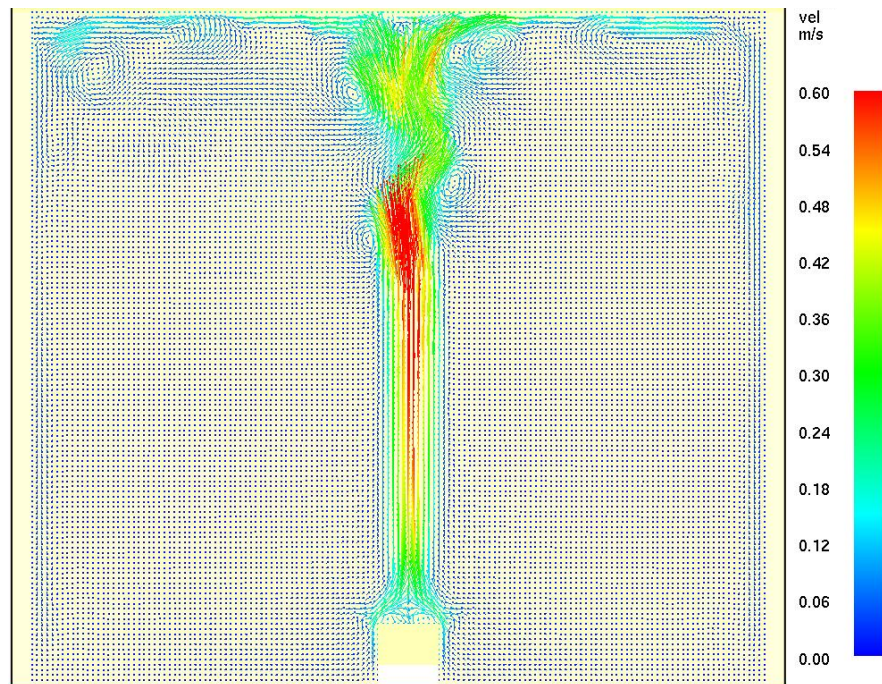


Abbildung 3.11: Wirbel bei 250°C

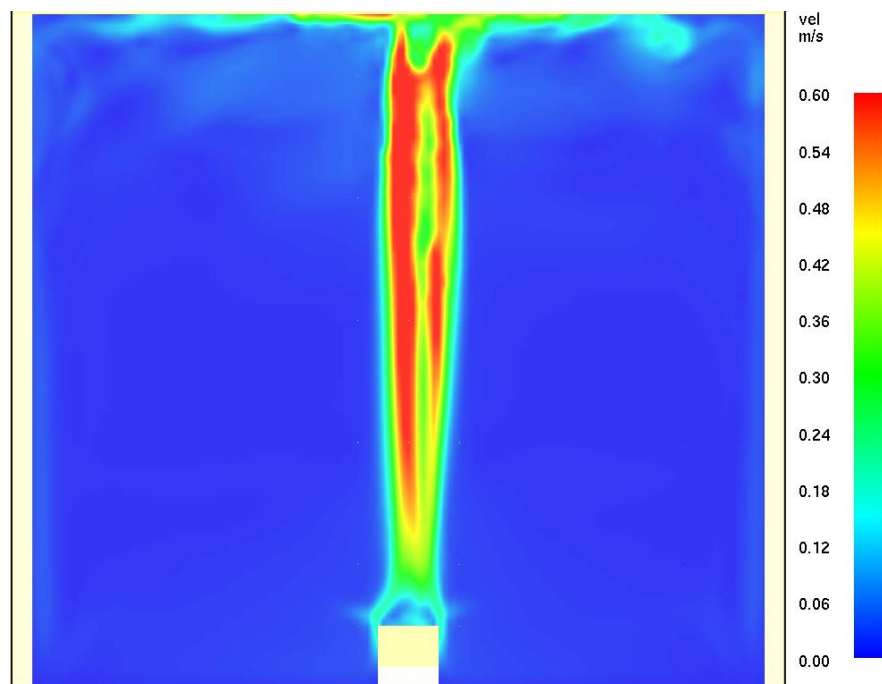


Abbildung 3.12: Doppelstrahl bei 250°C

3.4.3 Standardabweichung

Zur Berechnung der Standardabweichung werden zunächst, wie in Kapitel 3.2, mit Hilfe von „fds2ascii“ alle Einzeldaten des Zeitintervalls 150 s bis 160 s aus Smokeview exportiert. Ein Zeitschritt beträgt dabei 0,2 Sekunden. Es ergeben sich also 50 einzelne Dateien. Dabei wird nicht das gesamte Modell betrachtet, sondern nur der zehn Zentimeter große Ausschnitt, der auch in den Experimenten zu sehen ist. Zur Bearbeitung der Daten wird wieder ein Programm mit Python geschrieben, welches sich im Anhang befindet.

Die Berechnung der Standardabweichung soll für die Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung über alle Einzelaufnahmen jeweils auf der Plumemittelachse geschehen. Das bedeutet, dass für jedes Bild in jeder Höhe z_i nur ein Wert für die Geschwindigkeitskomponente „u“ betrachtet wird. Für jeweils eine Höhe werden dann aus allen Einzeldaten diese Werte in einem „Array“ zusammengefasst. Für jede Höhe beinhaltet das „Array“ also 50 Werte. Aus den 50 Werten wird dann die Standardabweichung der jeweiligen Höhe berechnet und graphisch dargestellt, siehe Abbildung 5.7.

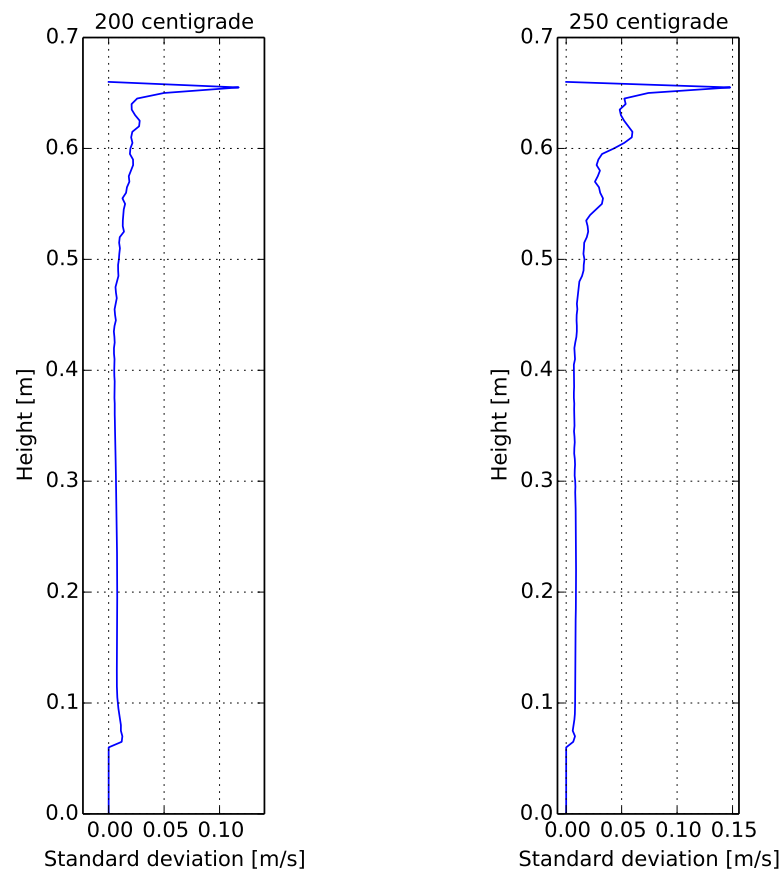


Abbildung 3.13: Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente „u“

Die Standardabweichung erfolgt über die Geschwindigkeitskomponente „u“, da diese die Informationen über die Wirbel enthält. Je größer der Wert der Geschwindigkeitskomponente „u“ ist, desto größer und schneller sind die Wirbel. Wie bereits in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, entstehen die Wirbel von 200°C zu 250°C Heizblocktemperatur auf der z-Achse weiter unten und werden dazu noch größer. Die beiden Diagramme der Standardabweichungen spiegeln genau das wieder. Bei 200°C steigt der Wert der Standardabweichung erst bei ungefähr 0,45 m an. Wie Abbildung 3.9 zeigt, entstehen an dieser Stelle die ersten Wirbel. Der Wert steigt kontinuierlich an und wird an der Decke noch einmal um ein Vielfaches größer. Wie bereits in Abschnitt 3.4.2 erwähnt, liegt das daran, dass die Strömung an der Decke ruckartig zur Seite hin ausweichen muss. Der maximale Wert der Standardabweichung von 200°C ergibt sich zu ungefähr 0.12 m/s.

Bei 250°C steigt der Wert der Standardabweichung bereits ab 0,4 m kontinuierlich an, was zusätzlich zu der Abbildung 3.11 bestätigt, dass die Wirbel früher entstehen als bei 200°C. Zudem steigt der Wert schneller an und erreicht einen höheren Maximalwert. Da bei der Strömung 250°C generell schneller ist, strömt sie natürlich auch im Bereich der Decke schneller zur Seite und erreicht damit höhere Werte.

4 Auswertung Experimente

4.1 Allgemeines

Die Auswertung der Experimente ist größtenteils Aufgabe der zweiten Thesis (LEONIE ROMMESWINKEL, 2015). Die Entstehung der Turbulenzeffekte und ihre Auswertung werden dort jedoch nicht behandelt. Da diese Auswertung aber für den Vergleich zwischen Experimenten und Simulationen benötigt wird, wird sie in diesem Kapitel betrachtet.

Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, werden eigens für die Auswertung der Turbulenzeffekte zwei Datensätze von 200°C und 250°C Oberflächentemperatur des Heizblocks erzeugt. Wie auch bei der Auswertung der Turbulenzeffekte aus den Simulationen werden hier die Einzelbilder und nicht die gemittelten Aufnahmen betrachtet. Da die Bilder über mehrere Höhen aufgenommen werden, müssen sie zunächst mit Hilfe von Python zusammengesetzt werden. Dafür wird ein Programm geschrieben, welches die Daten der einzelnen Höhen einliest und weiter verarbeitet. Jeder Datensatz unterteilt sich in vier Spalten. Die ersten beiden Spalten beinhalten die x und y Koordinaten und die letzten beiden die entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten in x- und in y-Richtung.

Stellt man die Daten der Höhen einzeln als Vektorfelder dar, besitzen sie jedes für sich eine eigene Größenordnung bzw. Farbskala. Daher wird für das zusammengesetzte Bild mit Hilfe von Python zunächst eine Einheit definiert, an welche dann die Größenordnungen der Einzeldaten angepasst werden. Da die Aufnahmen sich unterschiedlich stark überlappen, werden die Bilder noch auf ihrer y-Achse individuell verschoben.

4.2 Entstehung von Turbulenzeffekten

Um beurteilen zu können, ob bei 200°C und 250°C Turbulenzeffekte, wie zum Beispiel Wirbel, entstehen, werden zunächst mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Programm die Strömungsbilder aller Einzelaufnahmen erzeugt. Es sind 100 Aufnahmen aus insgesamt 10 Sekunden Messung vorhanden. Ein Zeitschritt beträgt demnach 0,1 Sekunden. Wird daraus ein kleiner Film erstellt, oder werden die Bilder einfach

schnell hintereinander laufen gelassen, lässt sich der dynamische Strömungsverlauf erkennen.

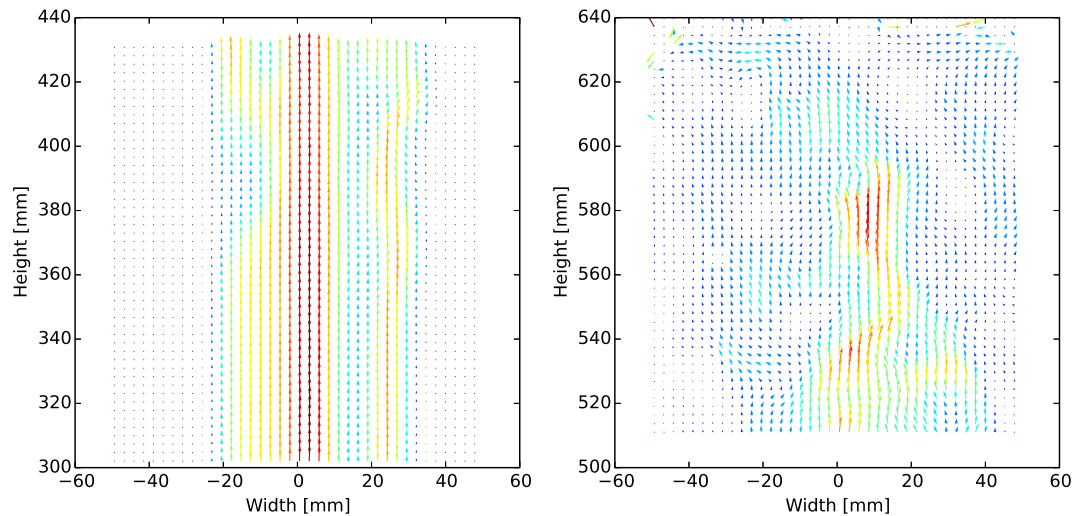


Abbildung 4.1: Wirbelentstehung bei 200°C (links) und an der Decke bei 250°C (rechts)

Bei 200°C ist zu beobachten, dass sich Wirbel bereits ab einer Höhe von 370 mm bilden. Bis zu dieser Stelle ist der Auftriebsstrahl nahezu gerade und außer einem Doppelstrahl ohne große Unregelmäßigkeiten. Bei 250°C bilden sich ab einer Höhe von 350 mm, also ungefähr zum gleichen Zeitpunkt, Wirbel aus. Die Größe der auftretenden Wirbel ist bei 250°C jedoch deutlich größer als bei 200°C. Ein Doppelstrahl tritt auch in diesem Fall auf. Bei 200°C zieht sich dieser teilweise bis in eine Höhe von ungefähr 540 mm. Die Wirbel treten dabei hauptsächlich auf der linken Seite des Auftriebsstrahls auf. Bei 250°C ist der Doppelstrahl bereits ab 420 mm Höhe nicht mehr zu sehen, da die Wirbel an dieser Stelle auf beiden Seiten auftreten. Ab 550 mm Höhe ist kaum noch eine nach oben gerichtete Struktur zu erkennen. Die Strömung wird von den Turbulenzen dominiert. Bei 200°C bleibt dagegen bis zum Ende eine nach oben gerichtete Struktur erhalten.

4.3 Standardabweichung

Die Berechnung der Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente „u“ aus den Experimenten geschieht analog zu der Berechnung aus den Simulationen. Mit Hilfe von Python wird ein Programm geschrieben, welches entlang der Plumemitte-lachse in jeder Höhe die Standardabweichung über die 100 Einzelaufnahmen berechnet. Das entsprechende Skript liegt dem Anhang bei.

Die Abbildung 4.2 zeigt die Standardabweichung für 200°C und 250°C. Da es sich um zusammengesetzte Daten handelt, ist jeder Abschnitt in einer anderen Farbe

dargestellt. Die Daten passen dabei nicht immer zu 100 Prozent aufeinander, wodurch an der Überlappung Sprünge entstehen können. Auf der Höhe des Heizblocks bei 60 mm schlagen die beiden Kurven von 200°C und 250°C sehr stark aus. Da der verwendete Kupferheizblock bei den Messungen das Licht des Lasers stark reflektiert hat und die Partikel dadurch nicht mehr gut sichtbar waren, hat die Software des PIV-Programms an dieser Stelle fehlerhafte Werte ausgegeben. Diese führen zu der starken Abweichung der Standardabweichung und sind daher zu vernachlässigen. Der interessante Bereich beginnt für beide Kurven ungefähr in 400 mm Höhe. Von dort bis in die Höhe von 600 mm steigt die Standardabweichung bei 200°C ungefähr linear an. Sie erreicht dabei einen maximalen Wert von 0,125 m/s. Der Verlauf bestätigt, dass dort eine unregelmäßige Strömung in Form von Wirbeln auftritt.

Auf den letzten Zentimetern schlägt die Kurve noch einmal stark aus und erreicht einen Wert von fast 0,25 m/s. Die Strömung trifft auf die Decke der Plexiglas-Box, was, wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt, dazu führt, dass die Strömung zur Seite ausweicht, bevor die Luft abkühlt und nach unten abfällt. Zusätzlich entstehen dadurch noch mehr Wirbel.

Bei 250°C steigt die Standardabweichung schneller an als bei 200°C. Das liegt daran, dass die Wirbel insgesamt größer werden und häufiger auftreten. Der Maximalwert liegt dabei mit 0,015 m/s jedoch nur knapp über dem von 200°C. Im Gegensatz zu 200°C bricht die Kurve von 250°C zum Ende hin nicht mehr aus. Das liegt an den starken Verwirbelungen, die in Kapitel 4.2 beschrieben sind. Da keine laminar nach oben gerichtete Strömung mehr vorhanden ist, bewirkt die Decke der Plexiglas-Box keinen allzu großen Richtungswechsel.

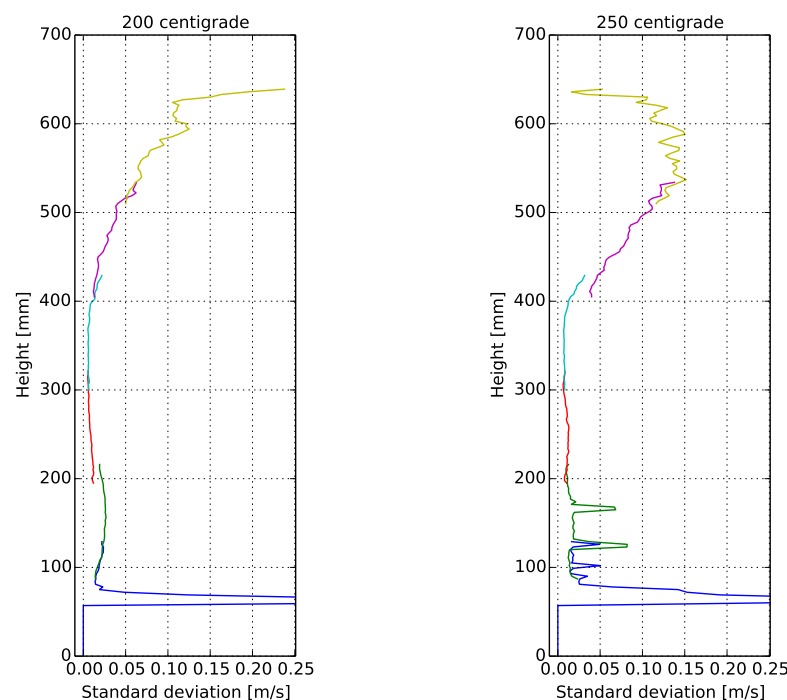


Abbildung 4.2: Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente „u“

5 Vergleich Experimente und Simulationen

5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Daten der Experimente mit denen der Simulationen verglichen. Grundlage dafür bilden die Auswertung der Simulationen aus Kapitel 3 und die Auswertung der Experimente. Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, werden die Strömungsprofile und die Geschwindigkeiten in z-Richtung in gegebenen Höhen und die daraus berechneten Flächenströme über gemittelte Daten aus zehn Sekunden Laufzeit miteinander verglichen. Für diesen Teil des Vergleichs stammen die Auswertungen der Experimente aus der zweiten Bachelor Thesis, (LEONIE ROMMESWINKEL, 2015). Zusätzlich werden für die höheren Oberflächentemperaturen 200°C und 250°C die auftretenden Turbulenzeffekte anhand von Einzeldaten verglichen. Für diesen Teil werden die Auswertungen der Experimente aus dem Kapitel 4 herangezogen.

Ein weiterer Aspekt, der verglichen werden soll, ist die konvektive Wärmefreisetzung in Abhängigkeit von der Heizblocktemperatur.

5.2 Strömungsprofile, Geschwindigkeitskomponente „w“ und Flächenströme

Bei der Betrachtung der gemittelten Strömungsprofile der Experimente und Simulationen fällt vor allem auf, dass der Plume der Simulationen senkrecht nach oben steigt, während der Plume der Experimente, je nach Temperatur mehr oder weniger stark, nach rechts neigt. Die Ursache dafür liegt in den Randbedingungen. Während der Experimente gibt es zwischendurch einen ungewollten Kaltluftzustrom aus einer Belüftungsanlage auf der linken Seite außerhalb der Plexiglas-Box, welcher nicht genau gemessen wird und daher nicht mit in die Simulationen einfließen kann.

In den Kurven und Flächenströmen der Geschwindigkeitskomponente „w“ für 50°C fällt dieser Unterschied kaum auf. Die Kurven der verschiedenen Höhen selbst sind zwar, genau wie der Plume, auf der x-Achse leicht verschoben, der Verlauf und der daraus berechnete Flächenstrom ähneln jedoch den Kurven der Simulationen. In der

obersten Höhe weicht der Flächenstrom nur um $0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$, also quasi überhaupt nicht ab. In den Simulationen steigt die Größe der Flächenströme mit zunehmender Höhe an. Bei den Experimenten ist dagegen keine klare Linie zu erkennen. Wie in Tabelle 5.1 zu sehen, steigt die Größe der Flächeströme zunächst an, fällt dann ab, steigt wieder an und fällt wieder ab. Die maximale Differenz der Flächenströme aus Experiment und Simulation ergibt sich also nicht immer in der selben Höhe oder den maximalen Flächenströmen. Daher werden für alle Temperaturen zusätzlich die Summe aus den Beträgen der Differenzen gebildet und in Tabelle 5.6 aufgelistet. Insgesamt bleibt die Differenz der Flächenströme in den einzelnen Höhen für 50°C bei maximal 25,74 %.

Für die maximal auftretenden Geschwindigkeiten ist die Differenz bedeutend größer. Während bei den Simulationen nur Geschwindigkeiten von etwa $0,3 \text{ m/s}$ auftreten werden in den Experimenten bereits Geschwindigkeiten von bis zu $0,6 \text{ m/s}$ erreicht. Die Geschwindigkeiten der Experimente sind also bereits bei 50°C doppelt so hoch wie in den Simulationen.

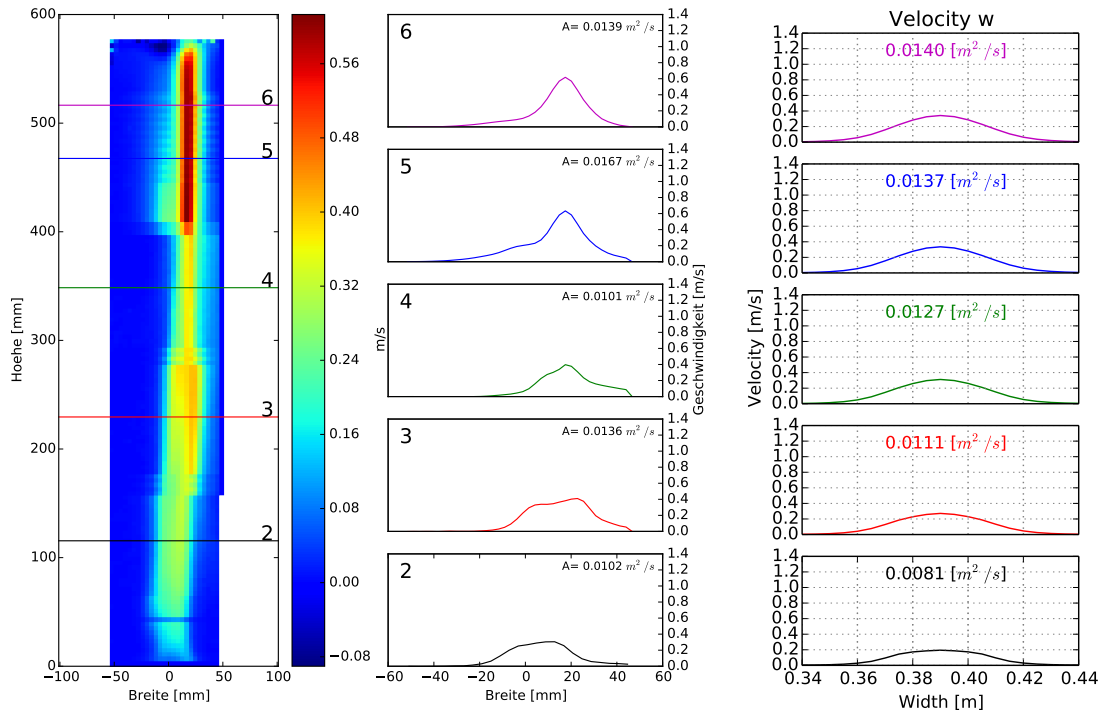


Abbildung 5.1: Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 50°C

Bei 100°C liegen die Geschwindigkeiten der Experimente mit etwas mehr als $0,7 \text{ m/s}$ immer noch deutlich über denen der Simulationen mit maximal $0,54 \text{ m/s}$, sind jedoch nicht mehr doppelt so groß.

Die Strömungsprofile und die Kurven der Geschwindigkeitskomponente „w“ weichen ebenfalls stark voneinander ab. Das Strömungsprofil der Simulationen weist, genau wie bei 50°C , einen gleichmäßigen Verlauf auf. Das Strömungsprofil der Experimente zeigt dagegen in den unteren und oberen beiden Höhen erste Unregelmäßigkeiten,

Höhe Nr.	Experiment [m^2/s]	Simulation [m^2/s]	Diff [m^2/s]	Diff [%]
1	0,0139	0,0140	-0,0001	-0,72
2	0,0167	0,0137	0,0030	17,96
3	0,0101	0,0127	-0,0026	-25,74
4	0,0136	0,0111	0,0025	18,38
5	0,0102	0,0081	0,0021	20,59

Tabelle 5.1: Vergleich Flächenströme bei 50°C

wie die Bildung eines Doppelstrahls. Die Breite des Plumes bleibt mit etwas über 6 cm jedoch ungefähr die gleiche wie in den Simulationen. Trotz der Bildung eines Doppelstrahls und der dementsprechend verlaufenden Kurve der Geschwindigkeitskomponente „w“ sind die Abweichungen der Flächenströme in der obersten Höhe mit 0,89 % vernachlässigbar klein. Wie in Tabelle 5.2 zu sehen ist, werden die Differenzen in den unteren Höhen jedoch wieder größer. Die größte Differenz der Flächenströme aus Experiment und Simulation ist mit 24,59 % ungefähr genau so groß wie die maximale Differenz bei 50°C. Die Summe der Differenzen steigt dabei von 15,97 % bei 50°C auf 16,15 % bei 100°C an und ist damit nur minimal gestiegen.

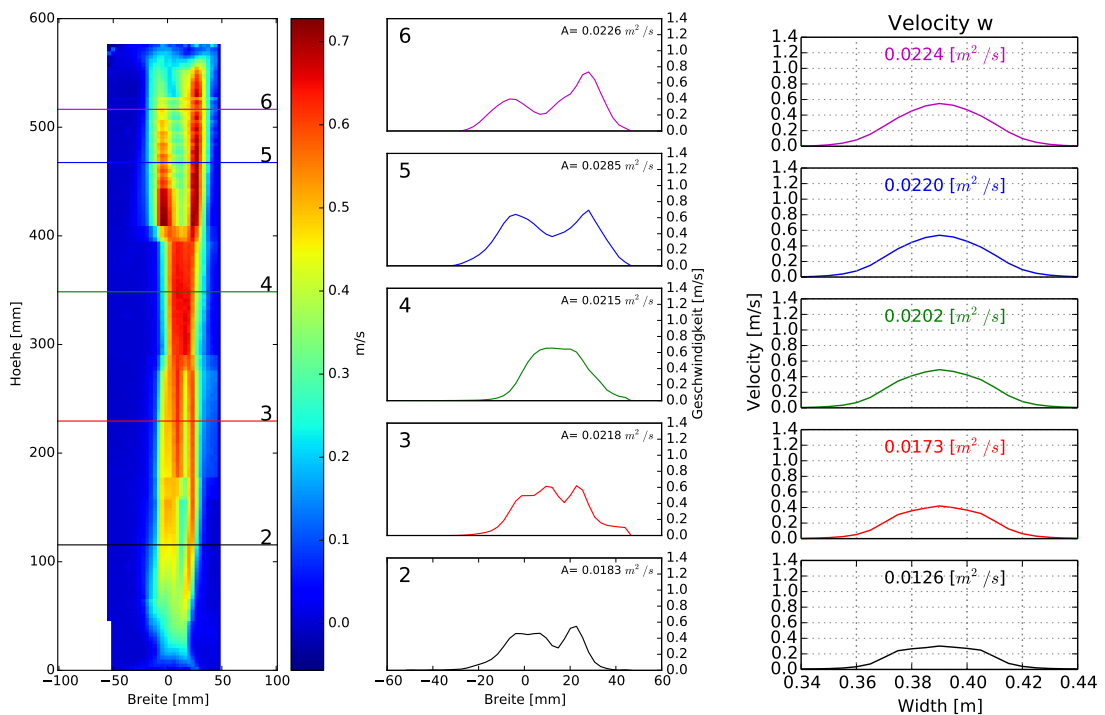


Abbildung 5.2: Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 100°C

Bei 150°C weist das Strömungsprofil der Simulationen erste Aufweitungen des Plumes auf. Auch in den Experimenten wird der Plume insgesamt etwas größer. Der Verlauf der Kurve der Geschwindigkeitskomponente „w“ aus den Experimenten ist dabei in den oberen beiden Höhen ähnlich dem aus den Simulationen. Die

Höhe Nr.	Experiment [m^2/s]	Simulation [m^2/s]	Diff. [m^2/s]	Diff. [%]
1	0,0226	0,0224	0,0002	0,89
2	0,0285	0,0220	0,0065	22,81
3	0,0215	0,0202	0,0013	6,05
4	0,0218	0,0173	0,0045	20,64
5	0,0183	0,0126	0,0057	24,59

Tabelle 5.2: Vergleich Flächenströme bei 100°C

Kurve steigt an und fällt zunächst mit etwa gleicher Neigung wieder ab. Nach einem kurzen Stück wird die Neigung jedoch flacher, wodurch der Nullpunkt erst wesentlich später erreicht wird. Der Doppelstrahl aus den Experimenten von 100°C ist weitestgehend verschwunden. Kleinere Unregelmäßigkeiten in den unteren Höhen bleiben jedoch bestehen.

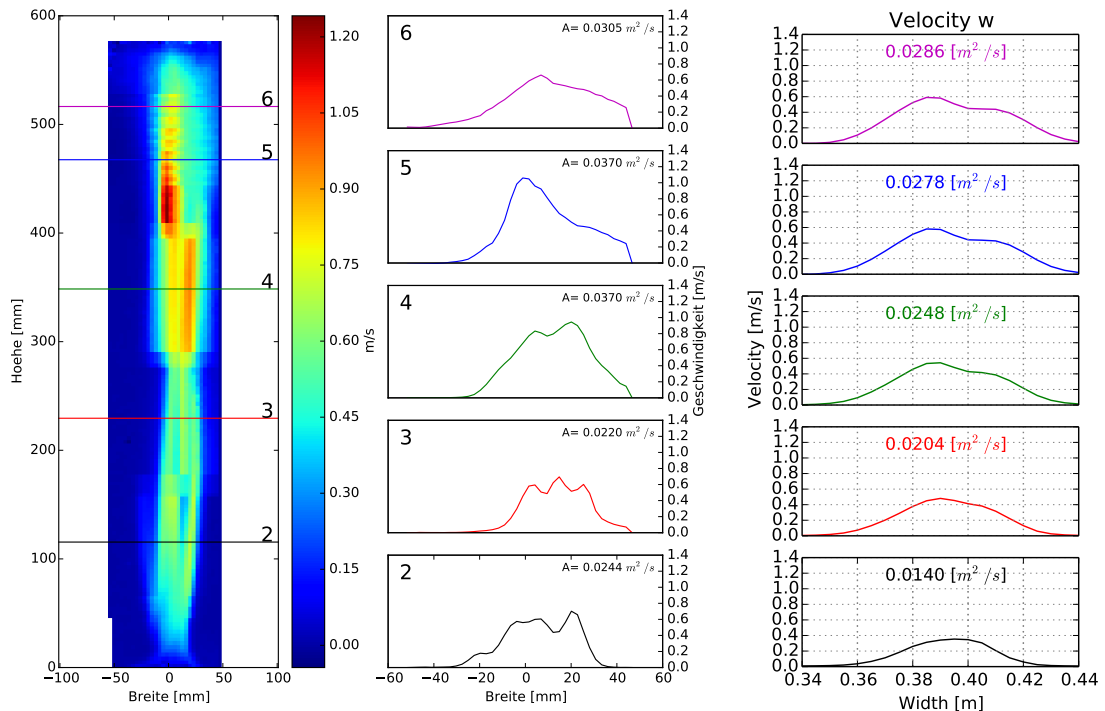


Abbildung 5.3: Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 150°C

Die Geschwindigkeiten steigen in den Experimenten extrem an und erreichen einen Maximalwert von gut 1,2 m/s. In den Simulationen steigen sie dagegen nur gering, bis auf knapp 0,6 m/s, an. Die maximale Geschwindigkeit der Experimente ist damit wieder doppelt so hoch wie die der Simulationen. Analog dazu nimmt auch die Differenz der Flächenströme enorm zu, Tabelle 5.3. Bei 100°C beträgt die maximale Differenz noch 24,59 %, bei 150°C steigt sie mit 42,62 % auf fast das Doppelte der

Differenz bei 100°C an. Diesen Anstieg spiegelt auch die Summe der Differenzen wieder. Hier steigt die Summe von 16,15 % für 100°C auf 23,39 % für 150°C an.

Höhe Nr.	Experiment [m^2/s]	Simulation [m^2/s]	Diff. [m^2/s]	Diff. [%]
1	0,0305	0,0286	0,0019	6,23
2	0,0370	0,0278	0,0092	24,86
3	0,0370	0,0248	0,0122	32,97
4	0,0220	0,0204	0,0016	7,27
5	0,0244	0,0140	0,0104	42,62

Tabelle 5.3: Vergleich Flächenströme bei 150°C

Die maximale Differenz der Flächenströme ist bei 200°C mit 43,21 % nur minimal größer als die von 150°C. Die Summe der Differenzen sinkt dagegen wieder auf einen Wert von 15,41 % und ist damit geringer als bei 50°C.

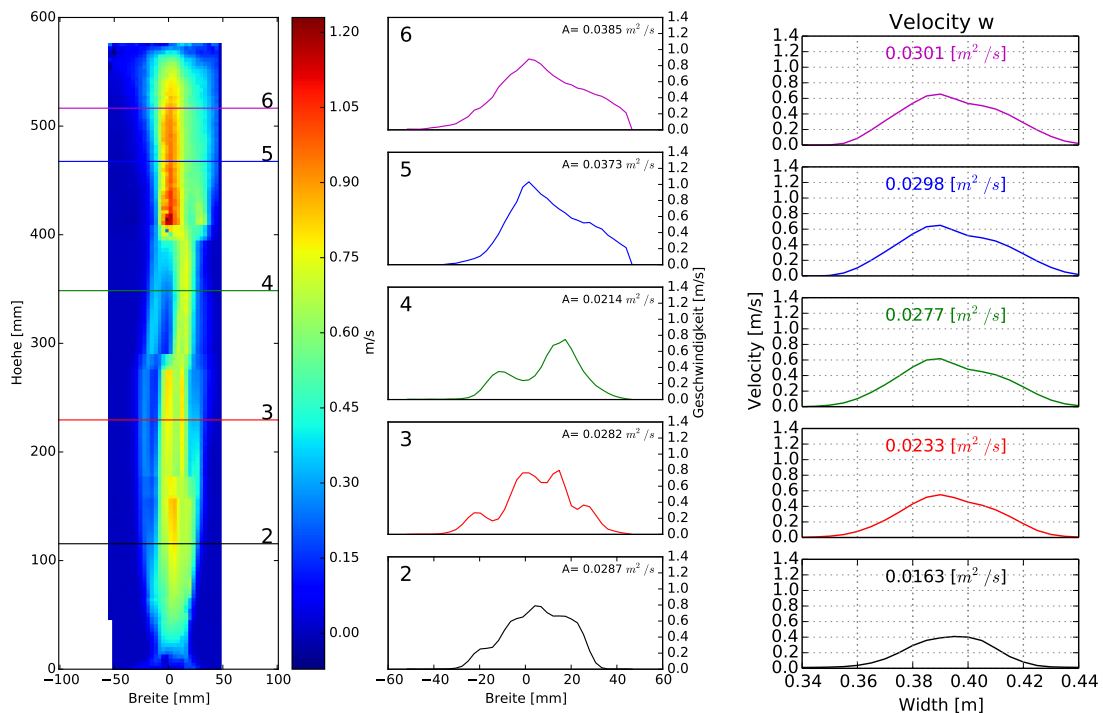


Abbildung 5.4: Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 200°C

Der Verlauf der Kurven der Geschwindigkeitskomponente „w“ aus den Experimenten ähnelt denen aus den Simulationen in den oberen beiden und der untersten Höhe. In den anderen beiden Höhen weist der Verlauf aus den Experimenten wieder größere Unregelmäßigkeiten auf. Eine Ursache dafür könnte sein, dass gemittelte Daten betrachtet werden und die Temperaturen mittlerweile hoch genug sind, um Turbulenzeffekte zu erzeugen. Solche Effekte besitzen wenig Regelmäßigkeit, sodass bei der Mittelung unterschiedliche Strömungsprofile entstehen.

Die maximalen Geschwindigkeiten der Experimente sind von 150°C zu 200°C nicht

sonderlich angestiegen und betragen immer noch ungefähr 1,2 m/s. Die Geschwindigkeiten der Simulationen sind dagegen auf etwa 0,66 m/s gestiegen. Damit ist die Differenz insgesamt etwas kleiner geworden.

Höhe Nr.	Experiment [m^2/s]	Simulation [m^2/s]	Diff. [m^2/s]	Diff [%]
1	0,0385	0,0301	0,0084	21,81
2	0,0373	0,0298	0,0075	20,10
3	0,0214	0,0277	-0,0063	-29,43
4	0,0282	0,0233	0,0049	17,38
5	0,0287	0,0163	0,0124	43,21

Tabelle 5.4: Vergleich Flächenströme bei 200°C

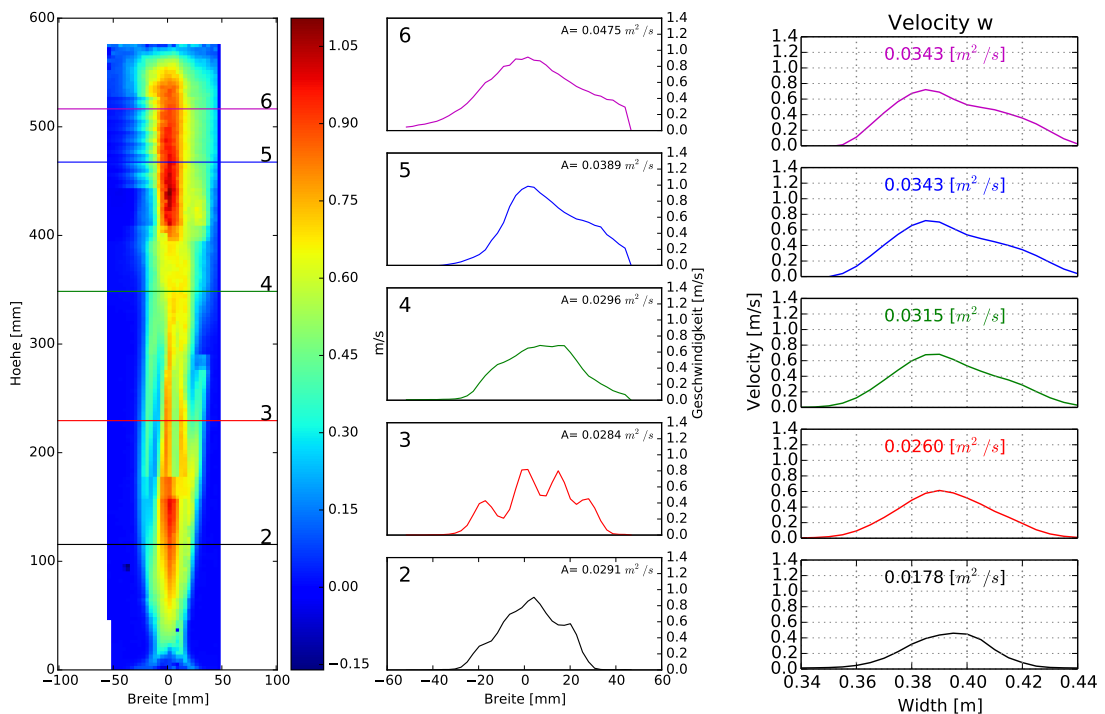


Abbildung 5.5: Vergleich z-Geschwindigkeiten bei 250°C

Höhe Nr.	Experiment [m^2/s]	Simulation [m^2/s]	Diff. [m^2/s]	Diff [%]
1	0,0475	0,0343	0,0132	27,79
2	0,0389	0,0343	0,0046	11,83
3	0,0296	0,0315	-0,0019	-6,42
4	0,0284	0,0260	0,0024	8,45
5	0,0291	0,0178	0,0113	38,83

Tabelle 5.5: Vergleich Flächenströme bei 250°C

Die maximal auftretenden Geschwindigkeiten bei 250°C sind in den Experimenten wieder etwas gesunken und betragen nur noch ungefähr 1,05 m/s. In den Simulationen sind sie wiederum auf etwa 0,72 m/s angestiegen. Die Geschwindigkeiten der Simulationen sind damit um nur noch ungefähr ein Drittel kleiner als die der Experimente.

Der Verlauf der Kurven der Geschwindigkeitskomponente gleichen, bis auf die zweite Höhe von unten, immer mehr den Kurven aus den Simulationen. Die maximale Differenz aus den Flächenströmen sinken ebenfalls auf 38,83 %. Die Summe der Differenzen steigt dagegen wieder auf 19,83 % an.

Temperatur	Summe Differenzen [m^2/s]	Summe Differenzen [%]
50°C	0,0103	15,97
100°C	0,0182	16,15
150°C	0,0353	23,39
200°C	0,0395	15,41
250°C	0,0334	19,83

Tabelle 5.6: Summe der Differenzen aus den Flächenströmen

5.3 Turbulenzen

Der Vergleich der Turbulenzen im Bezug auf die Turbulenzeffekte und die Standardabweichung liefert die gleichen Ergebnisse wie auch die anderen Vergleiche. Wird die Kurve der Standardabweichung der Geschwindigkeit in x-Richtung für 200°C betrachtet, ist für die Experimente und die Simulationen der Verlauf relativ ähnlich. In den Experimenten entstehen die Wirbel in einer Höhe von ungefähr 37 cm. In den Simulationen entstehen sie etwas später bei ungefähr 45 cm. Von da an steigen beide Kurven konstant an, da mit zunehmender Höhe immer mehr Wirbel entstehen. An der Decke der Plexiglasbox steigen beide Kurven auf einen Extremwert an, da die Strömung plötzlich zur Seite ausweicht. Dieser Extremwert und der zuvor erreichte Maximalwert unterscheiden sich dabei sehr stark in ihrer Größe. In den Experimenten beträgt die maximale Standardabweichung ohne den Ausreißer an der Decke 0,125 m/s. In den Simulationen schafft es der Wert nur auf 0,025 m/s. Das ist ein Unterschied von 80 Prozent. In den Experimenten treten also für die gleiche Heizblocktemperatur 80 Prozent mehr bzw. größere Wirbel auf als in den Simulationen.

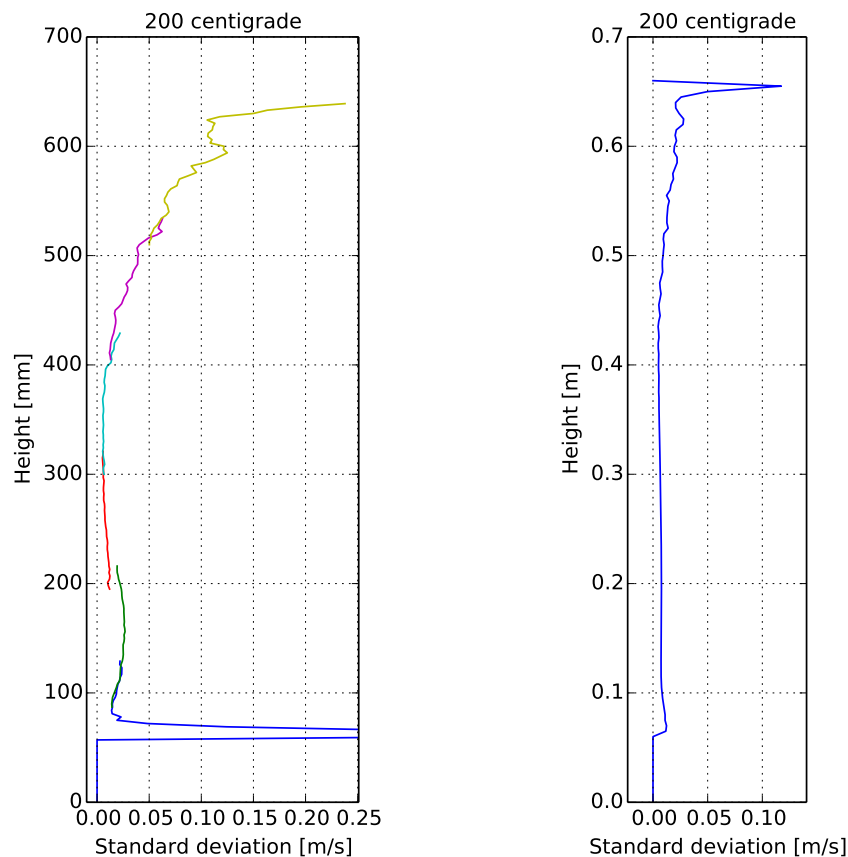


Abbildung 5.6: Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente „u“

Für 250°C sieht die Größenordnung der Standardabweichung ähnlich aus. Zusätzlich dazu unterscheiden sich jedoch auch die Verläufe der Kurven voneinander. Der Verlauf der Standardabweichung ist ähnlich dem der Kurven aus den Experimenten und Simulationen für 200°C. Die Entstehung der Wirbel beginnt ungefähr bei 40 cm. Von da an steigt die Standardabweichung bis auf einen Maximalwert von 0,06 m/s. An der Decke schlägt die Kurve dann bis auf einen Extremwert von 0,15 m/s aus. Für die Experimente ist der Verlauf zunächst ähnlich. Ab einer Höhe von ungefähr 35 cm beginnt die Kurve der Standardabweichung anzusteigen. Der Maximalwert beträgt dabei 0,15 m/s und ist damit gut 60 Prozent größer als in den Simulationen. An der Decke unterscheidet sich nun jedoch der Verlauf der Kurven. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, weist der Auftriebsstrahl der Experimente ab einer Höhe von ungefähr 55 cm keine gerade nach oben gerichteten Strömungen mehr auf, so dass die Verwirbelungen dominieren. Das Hindernis der Decke kann also nicht mehr zu starken seitlichen Strömungen führen. Dieser Unterschied entsteht durch die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Denn je höher die Geschwindigkeiten sind, desto mehr Wirbel entstehen, bis der laminare Anteil ganz verschwunden ist und sich eine komplett turbulente Strömung einstellt.

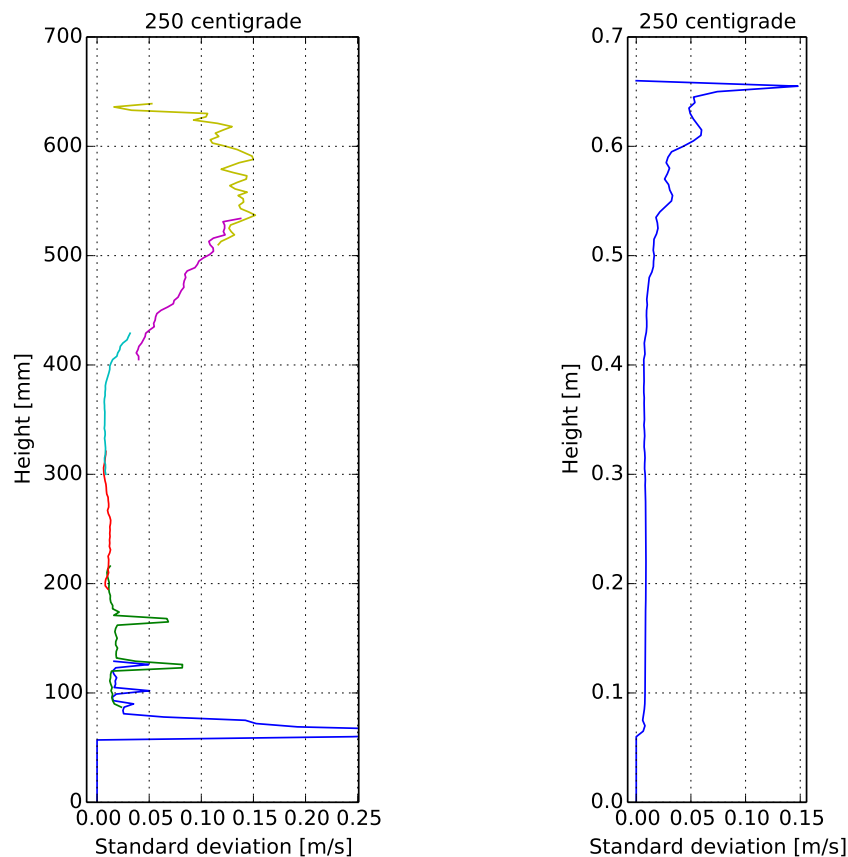


Abbildung 5.7: Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente „u“

5.4 Konvektive Wärmefreisetzung

Für den Vergleich der konvektiven Wärmefreisetzung in Abhängigkeit der Heizblocktemperaturen müssen zunächst die fehlenden Daten der Experimente berechnet werden. Aus den Thermographiaufnahmen liegt nur die gesamte Wärmefreisetzung vor. Von dieser wird für die entsprechenden Temperaturen der radiative Teil abgezogen, um den konvektiven Anteil zu erhalten. Da bei den Thermographiaufnahmen nicht exakt die gleichen Heizblocktemperaturen realisiert werden wie in den Simulationen, wird zunächst zwischen den Werten interpoliert, um die Wärmefreisetzung für die benötigten Heizblocktemperaturen zu erhalten. Anschließend wird mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$\Delta P_{rad} = A * \sigma * \epsilon * (T_{surf}^4 - T_{\infty}^4) \quad [W]$$

der radiative Anteil berechnet und von der gesamten Wärmefreisetzung abgezogen.

$$\Delta P_{rad} = 0,0132 * 5,67 * 10^{-8} * 0,82 * ((T_{Heiz} + 273)^4 - 293^4) \quad [W]$$

Tabelle 5.7 zeigt in der ersten Spalte die realisierten Heizblocktemperaturen und in der zweiten die entsprechend interpolierten Werte für die Wärmefreisetzung, bzw. die Leistung. Die dritte und vierte Spalte enthalten den berechneten radiativen Anteil und den sich daraus ergebenden konvektiven Anteil der Wärmefreisetzung.

T_{Heiz} [°C]	Leistung P [W]	ΔP_{rad} [W]	ΔP_{konv} [W]
50,0	8,97	-0,36	9,32
97,7	18,55	3,18	15,37
145,2	28,81	8,57	20,24
192,5	48,16	16,36	31,80
239,6	70,00	27,14	42,86

Tabelle 5.7: Konvektive Wärmefreisetzung in den Experimenten für die realisierten Heizblocktemperaturen der Simulationen

Für die Simulationen ergibt sich die konvektive Wärmefreisetzung aus den Daten des „Heat Flows“. Tabelle 5.8 zeigt die konvektive Wärmefreisetzung der Experimente und der Simulationen im Vergleich.

Wie zu erkennen ist, weichen die Werte der Experimente und Simulationen sehr stark von einander ab. Diese Abweichung könnte die Ursache für die Unterschiede in den Strömungsgeschwindigkeiten sein. Denn je mehr Wärme freigesetzt wird, desto schneller ist die Strömung. Um das zu testen, werden noch einmal die Strömungen verglichen, diesmal jedoch nicht anhand der Heizblocktemperaturen, sondern anhand der konvektiven Wärmefreisetzung. Dazu wird zunächst noch die konvektive Wärmefreisetzung der tatsächlichen Heizblocktemperaturen aus Tabelle 2.7 berechnet.

T_{Heiz} [°C]	ΔP_{konv} Exp. [W]	ΔP_{konv} Simu. [W]	Differenz [%]
50,0	9,32	1,23	86,80
97,7	15,37	4,50	70,72
145,2	20,24	8,83	56,37
192,5	31,80	13,78	56,67
239,6	42,86	19,43	54,67

Tabelle 5.8: Konvektive Wärmefreisetzung im Vergleich

T_{Heiz} [°C]	Leistung P [W]	ΔP_{rad} [W]	ΔP_{konv} [W]
49,0	8,77	-0,42	9,19
104,1	19,86	3,78	16,08
152,8	31,10	9,65	21,45
202,2	53,15	18,31	34,84
252,0	75,75	30,57	45,18

Tabelle 5.9: Konvektive Wärmefreisetzung in den Experimenten

Die farbig dargestellten Werte in den Tabellen 5.8 und 5.9 zeigen bei Betrachtung der Heizblocktemperaturen, dass ein ähnlicher Wert der konvektiven Wärmefreisetzung aus den Simulationen bei einer rund 100°C höheren Temperatur auftritt als in den Experimenten. Für die Strömungen werden also die Geschwindigkeiten der Heizblocktemperaturen von 50°C, 100°C und 150°C in den Experimenten mit denen von 150°C, 200°C und 250°C aus den Simulationen verglichen.

Für den ersten Fall sind die Geschwindigkeiten mit rund 0,56 m/s nun tatsächlich für die Experimente und Simulationen gleich. Im Vergleich von 100°C aus den Experimenten und 200°C aus den Simulationen ist die konvektive Wärmefreisetzung und damit auch die Strömungsgeschwindigkeit aus den Experimenten mit 0,7 m/s etwas größer als die der Experimente mit 0,66 m/s. Für den letzten Vergleich weichen die Geschwindigkeiten mit 1,2 m/s in den Experimenten und 0,72 m/s in den Simulationen immer noch sehr stark voneinander ab.

Generell haben die Unterschiede in der konvektiven Wärmefreisetzung also einen Einfluss auf die Unterschiede der Strömungsgeschwindigkeiten, jedoch sind sie nicht allein dafür verantwortlich.

6 Fazit

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigen, dass die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Strömungsexperimente und den Ergebnissen der Simulationen ganz erheblich sind.

Der Vergleich zwischen den Strömungsexperimenten und den darauf basierenden Simulationen zeigt, dass für die Hauptversuche eine stärkere Anpassung der äußeren Randbedingungen erforderlich wird. Maßnahmen, die daher zunächst ergriffen werden sollten, sind, dass der Versuchsaufbau der Strömungsexperimente entweder stärker von äußeren Einflüssen wie Kaltluftereinstromungen aus Lüftungsanlagen abgeschottet wird oder weitere Messungen erfolgen müssen, die diese Randbedingungen für die Simulation erfassen können.

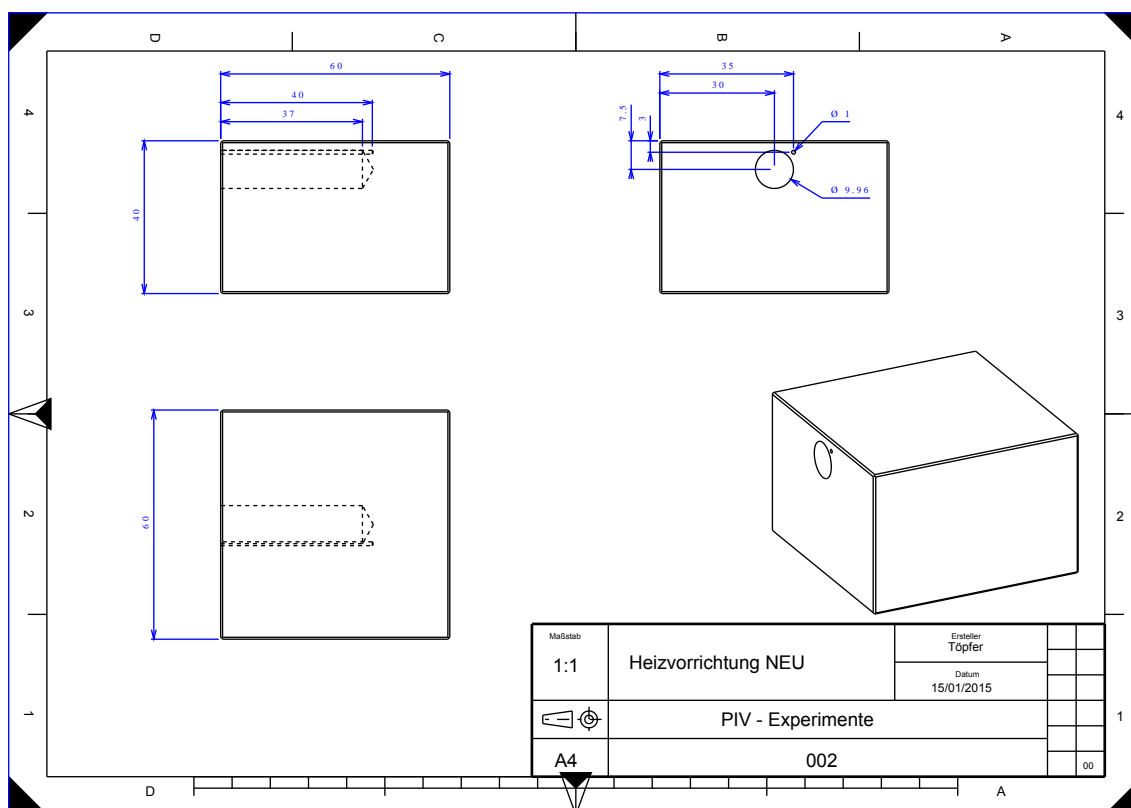
Die Auswertung der konvektiven Wärmefreisetzung hat zusätzlich ergeben, dass der Heizquelle eine noch größere Beachtung zuteil werden sollte. Es ist zum einen sinnvoll weitere Thermographieaufnahmen der Heizquelle zu machen, in denen besonders auf die Wärmefreisetzung und den Emissionsgrad geachtet werden sollte. Zum anderen sollte über einen dauerhaften Umbau der Heizquelle mit einer zu definierenden Spannung nachgedacht werden, da eine Anpassung der Heizblocktemperaturen nicht mehr nötig wäre.

Literaturverzeichnis

- LEONIE ROMMESWINKEL (2015) *Bachelor Thesis - PIV-basierte Strömungsmessungen im Modellmaßstab: Durchführung und Auswertung*, März 2015
- RAFFEL, M.; WILLERT, C. E.; WERELEY, S. T.; KOMPENHANS, J. (2007) *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide*, Springer, Second Edition, 2007
- KARL WALLASCH, BORIS STOCK (2008) *Das Fire Dynamics Simulator Handbuch - Brandsimulationen mit FDS*, 1. Auflage, 2008
- FDS USERGROUP (2014) *FDS Leitfaden - Entwurf*, 04. März 2014
- MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; MCDERMOTT, R.; FLOYD, J.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K. (2014) *Fire Dynamics Simulator - User's Guide*, NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, 30. September 2014
- KERN GMBH, TECHNISCHE KUNSTSTOFFTEILE (2014) *Technisches Datenblatt - Polymethylmethacrylat (PMMA)*, 2014
- PROMAT GMBH (2014) *Technisches Datenblatt - Promatect-L*, 2014

Anhang

Technische Zeichnung Heizblock



Eingabe Code Simulation mit FDS

Simulationsbeginn

&HEAD CHID='Modell_05cm' /

Simulationsdauer

&TIME T_END = 100 /

Restart Befehl und Oberflächenaufzeichnung = Ausgeschaltet

&MISC RESTART=.FALSE. BNDF_DEFAULT=.FALSE./

Gitterauflösung

&MESH ID='mesh' IJK=38, 30, 36 XB=0,0.76,0,0.60,-0.04,0.68 /

Ausgabeparameter der Oberflächenaufzeichnung

&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX' /

Temperaturschichtung der Umgebungsluft

&INIT XB=0.0,0.74, 0.0,0.58, 0.54,0.66, TEMPERATURE=30.3 /

&INIT XB=0.0,0.74, 0.0,0.58, 0.42,0.54, TEMPERATURE=27.5 /

&INIT XB=0.0,0.74, 0.0,0.58, 0.30,0.42, TEMPERATURE=24.5 /

&INIT XB=0.0,0.74, 0.0,0.58, 0.18,0.30, TEMPERATURE=23.1 /

&INIT XB=0.0,0.74, 0.0,0.58, 0.06,0.18, TEMPERATURE=22.5 /

&INIT XB=0.0,0.74, 0.0,0.58, 0.00,0.06, TEMPERATURE=20.0 /

Versuchsaufbau

Plexiglasbox

&OBST XB=0.0,0.76, 0.0,0.02, 0.0,0.66, SURF_ID='GLASWAND' / # Vorne

&OBST XB=0.0,0.76, 0.58,0.60, 0.0,0.66, SURF_ID='GLASWAND' / # Hinten

&OBST XB=0.0,0.02, 0.0,0.60, 0.0,0.66, SURF_ID='GLASWAND' / # Links

&OBST XB=0.74,0.76, 0.0,0.60, 0.0,0.66, SURF_ID='GLASWAND' / # Rechts

&OBST XB=0.0,0.76, 0.0,0.60, 0.66,0.68, SURF_ID='GLASWAND' / # Decke

&MATL ID='GLAS', CONDUCTIVITY=0.19, DENSITY=1190,

SPECIFIC_HEAT=1.42 /

&SURF ID='GLASWAND', MATL_ID='GLAS', THICKNESS=0.005,

COLOR='WHITE', TRANSPARENCY=0.3 /

Holzplatte

&OBST XB=0.0,0.76, 0.0,0.60, -0.04,0.00, COLOR='BROWN',

SURF_ID='HOLZPLATTE' /

&MATL ID='HOLZ', CONDUCTIVITY=0.17, DENSITY=800,

SPECIFIC_HEAT=2.28 /

```
&SURF ID='HOLZPLATTE', MATL_ID='HOLZ', THICKNESS=0.04,
                                         COLOR='BROWN'/

##### Promatplatte
&OBST XB=0.36,0.42, 0.28,0.34, 0.0,0.02, COLOR='WHITE',
                                         SURF_ID='PROMATPLATTE'/
&MATL ID='PROMAT', CONDUCTIVITY=0.083, DENSITY=450,
                                         SPECIFIC_HEAT=0.95 /
&SURF ID='PROMATPLATTE', MATL_ID='PROMAT', THICKNESS=0.02,
                                         COLOR='WHITE'/

##### Kupferblock
&OBST XB=0.36,0.42, 0.28,0.34, 0.02,0.06, SURF_ID='INERT'/

##### Wärmequelle mit Eingeschalteter Oberflächenaufzeichnung
&OBST XB=0.36,0.42, 0.28,0.34, 0.02,0.06, SURF_ID='HOT',
                                         BNDF_OBST=.TRUE./
&SURF ID='HOT', TMP_FRONT=250, RGB=100,0,0 /

##### Beobachtungspunkte
##### Vertikal-Ebene senkrecht zu Y in Mitte des Heizblocks (Vektoren)
&SLCF PBX=0.31, QUANTITY='TEMPERATURE'/ # Temperaturmessung
&SLCF PBX=0.31, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
                                         # Geschwindigkeitsmessung

##### Vertikal-Ebene senkrecht zu X in Mitte des Heizblocks (Vektoren)
&SLCF PBX=0.39, QUANTITY='TEMPERATURE'/ #Temperaturmessung
&SLCF PBX=0.39, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE./
                                         # Geschwindigkeitmessung

##### Ebenen am Rand zur Temperatur Beobachtung
&SLCF PBX=0.50, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=0.66, QUANTITY='TEMPERATURE' /

##### Horizontal-Ebene über dem Heizblock in verschiedenen Höhen
                                         (Temperaturmessung)
&SLCF PBZ=0.06, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=0.12, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=0.24, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=0.36, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=0.48, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=0.60, QUANTITY='TEMPERATURE' /

##### Messung des Wärmestroms über dem Heizblock
```

```
&DEVC ID='HEAT_0.06' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.06,0.06,  
                                QUANTITY='HEAT FLOW'/  
&DEVC ID='HEAT_0.12' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.12,0.12,  
                                QUANTITY='HEAT FLOW'/  
&DEVC ID='HEAT_0.24' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.24,0.24,  
                                QUANTITY='HEAT FLOW'/  
&DEVC ID='HEAT_0.36' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.36,0.36,  
                                QUANTITY='HEAT FLOW'/  
&DEVC ID='HEAT_0.48' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.48,0.48,  
                                QUANTITY='HEAT FLOW'/  
&DEVC ID='HEAT_0.60' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.60,0.60,  
                                QUANTITY='HEAT FLOW'/
```

Messung des Volumenstroms über dem Heizblock

```
&DEVC ID='VOLUME_0.06' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.06,0.06,  
                                QUANTITY='VOLUME FLOW'/  
&DEVC ID='VOLUME_0.12' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.12,0.12,  
                                QUANTITY='VOLUME FLOW'/  
&DEVC ID='VOLUME_0.24' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.24,0.24,  
                                QUANTITY='VOLUME FLOW'/  
&DEVC ID='VOLUME_0.36' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.36,0.36,  
                                QUANTITY='VOLUME FLOW'/  
&DEVC ID='VOLUME_0.48' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.48,0.48,  
                                QUANTITY='VOLUME FLOW'/  
&DEVC ID='VOLUME_0.60' XB=0.30,0.48,0.22,0.40,0.60,0.60,  
                                QUANTITY='VOLUME FLOW'/
```

Messung der Temperatur direkt auf der Heizfläche

```
&DEVC ID='MT_0.06', XYZ=0.39,0.31,0.06, QUANTITY='TEMPERATURE'/
```

Messung der Temperaturen über dem Heizblock in

verschiedenen Höhen

```
&DEVC ID='MT_0.12', XYZ=0.39,0.31,0.12, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&DEVC ID='MT_0.24', XYZ=0.39,0.31,0.24, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&DEVC ID='MT_0.36', XYZ=0.39,0.31,0.36, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&DEVC ID='MT_0.48', XYZ=0.39,0.31,0.48, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&DEVC ID='MT_0.60', XYZ=0.39,0.31,0.60, QUANTITY='TEMPERATURE'/
```

Messung der Temperaturen 2cm links neben dem Heizblock in

verschiedenen Höhen

```
&DEVC ID='LT_0.06', XYZ=0.34,0.31,0.06, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&DEVC ID='LT_0.12', XYZ=0.34,0.31,0.12, QUANTITY='TEMPERATURE'/
```

```
&DEVC ID='LT_0.24', XYZ=0.34,0.31,0.24, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='LT_0.36', XYZ=0.34,0.31,0.36, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='LT_0.48', XYZ=0.34,0.31,0.48, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='LT_0.60', XYZ=0.34,0.31,0.60, QUANTITY='TEMPERATURE'/
```

Messung der Temperaturen 2cm rechts neben dem Heizblock in
verschiedenen Höhen

```
&DEVC ID='RT_0.06', XYZ=0.44,0.31,0.06,QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='RT_0.12', XYZ=0.44,0.31,0.12,QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='RT_0.24', XYZ=0.44,0.31,0.24,QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='RT_0.36', XYZ=0.44,0.31,0.36,QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='RT_0.48', XYZ=0.44,0.31,0.48,QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='RT_0.60', XYZ=0.44,0.31,0.60,QUANTITY='TEMPERATURE'/
```

Messung der Strömungsgeschwindigkeiten über dem Heizblock in
verschiedenen Höhen

```
&DEVC ID='VEL_0.06', XYZ=0.39,0.31,0.06, QUANTITY='VELOCITY'/
&DEVC ID='VEL_0.12', XYZ=0.39,0.31,0.12, QUANTITY='VELOCITY'/
&DEVC ID='VEL_0.23', XYZ=0.39,0.31,0.24, QUANTITY='VELOCITY'/
&DEVC ID='VEL_0.36', XYZ=0.39,0.31,0.36, QUANTITY='VELOCITY'/
&DEVC ID='VEL_0.48', XYZ=0.39,0.31,0.48, QUANTITY='VELOCITY'/
&DEVC ID='VEL_0.60', XYZ=0.39,0.31,0.60, QUANTITY='VELOCITY'/
```

Messung der Temperaturen an Temperaturmesspunkten

```
&DEVC ID='T_0.12', XYZ=0.66,0.50,0.12, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='T_0.24', XYZ=0.66,0.50,0.24, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='T_0.36', XYZ=0.66,0.50,0.36, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='T_0.48', XYZ=0.66,0.50,0.48, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='T_0.60', XYZ=0.66,0.50,0.60, QUANTITY='TEMPERATURE'/
```

Messung der Temperatur direkt über der Heizfläche

```
&DEVC ID='MTC_0.06', XYZ=0.39,0.31,0.06, QUANTITY=
'THERMOCOUPLE'/
```

Messung der Temperaturen über dem Heizblock in verschiedenen
Höhen

```
&DEVC ID='MTC_0.12', XYZ=0.39,0.31,0.12, QUANTITY=
'THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='MTC_0.24', XYZ=0.39,0.31,0.24 QUANTITY=
'THERMOCOUPLE'/
&DEVC ID='MTC_0.36', XYZ=0.39,0.31,0.36 QUANTITY=
'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='MTC_0.48', XYZ=0.39,0.31,0.48, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='MTC_0.60', XYZ=0.39,0.31,0.60, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
##### Messung Temperaturen 2cm links neben dem Heizblock in v. H.
```

```
&DEVC ID='LTC_0.06', XYZ=0.34,0.31,0.06, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='LTC_0.12', XYZ=0.34,0.31,0.12, QUANTITY=
                                THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='LTC_0.24', XYZ=0.34,0.31,0.24, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='LTC_0.36', XYZ=0.34,0.31,0.36, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='LTC_0.48', XYZ=0.34,0.31,0.48, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='LTC_0.60', XYZ=0.34,0.31,0.60, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
##### Messung Temperaturen 2cm rechts neben dem Heizblock i. v. H.
```

```
&DEVC ID='RTC_0.06', XYZ=0.44,0.31,0.06, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='RTC_0.12', XYZ=0.44,0.31,0.12, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='RTC_0.24', XYZ=0.44,0.31,0.24, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='RTC_0.36', XYZ=0.44,0.31,0.36, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='RTC_0.48', XYZ=0.44,0.31,0.48, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
&DEVC ID='RTC_0.60', XYZ=0.44,0.31,0.60, QUANTITY=
                                'THERMOCOUPLE'/
```

```
##### Messung der Temperaturen an Temperaturmesspunkten
```

```
&DEVC ID='TC_0.12', XYZ=0.66,0.50,0.12,
```

```
&DEVC ID='TC_0.24', XYZ=0.66,0.50,0.24,
```

```
&DEVC ID='TC_0.36', XYZ=0.66,0.50,0.36,
```

```
&DEVC ID='TC_0.48', XYZ=0.66,0.50,0.48,
```

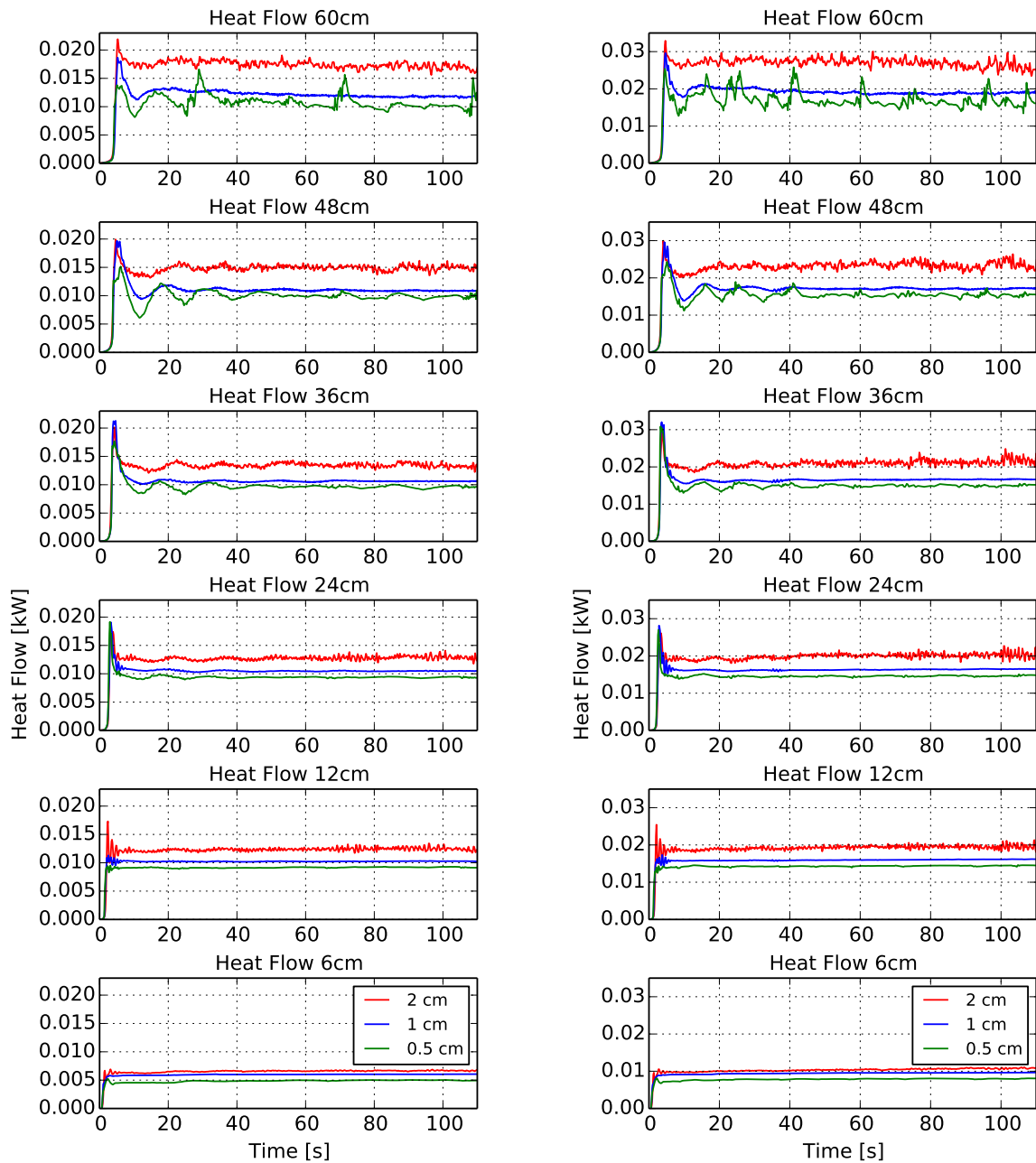
```
&DEVC ID='TC_0.60', XYZ=0.66,0.50,0.60,
```

```
##### Ende
```

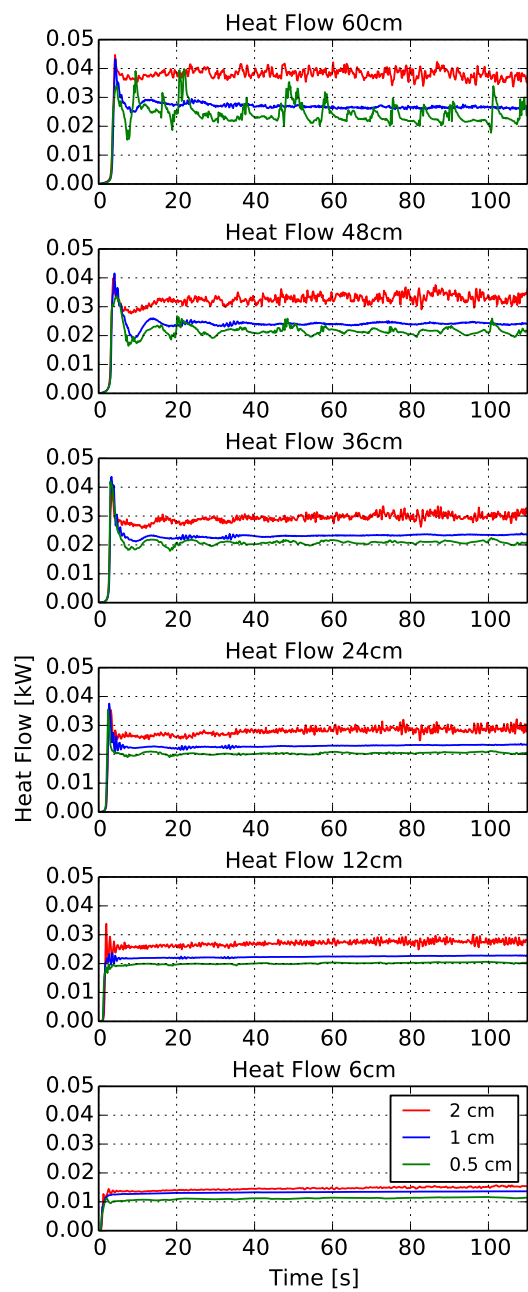
```
&TAIL /
```

Diagramme Gitterstudie

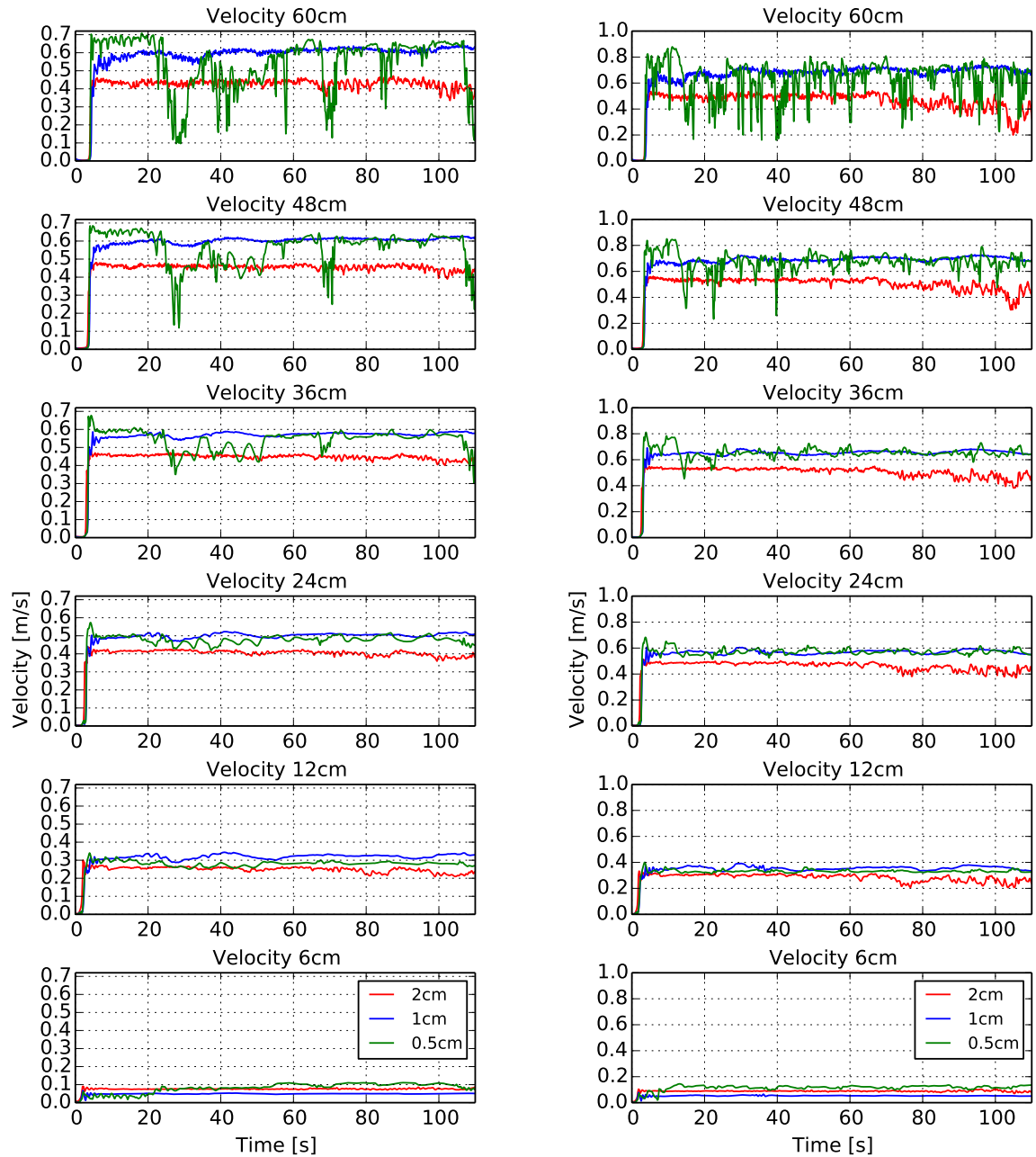
Gitterstudie Wärmestrom bei 150°C (links) und 200°C (rechts)



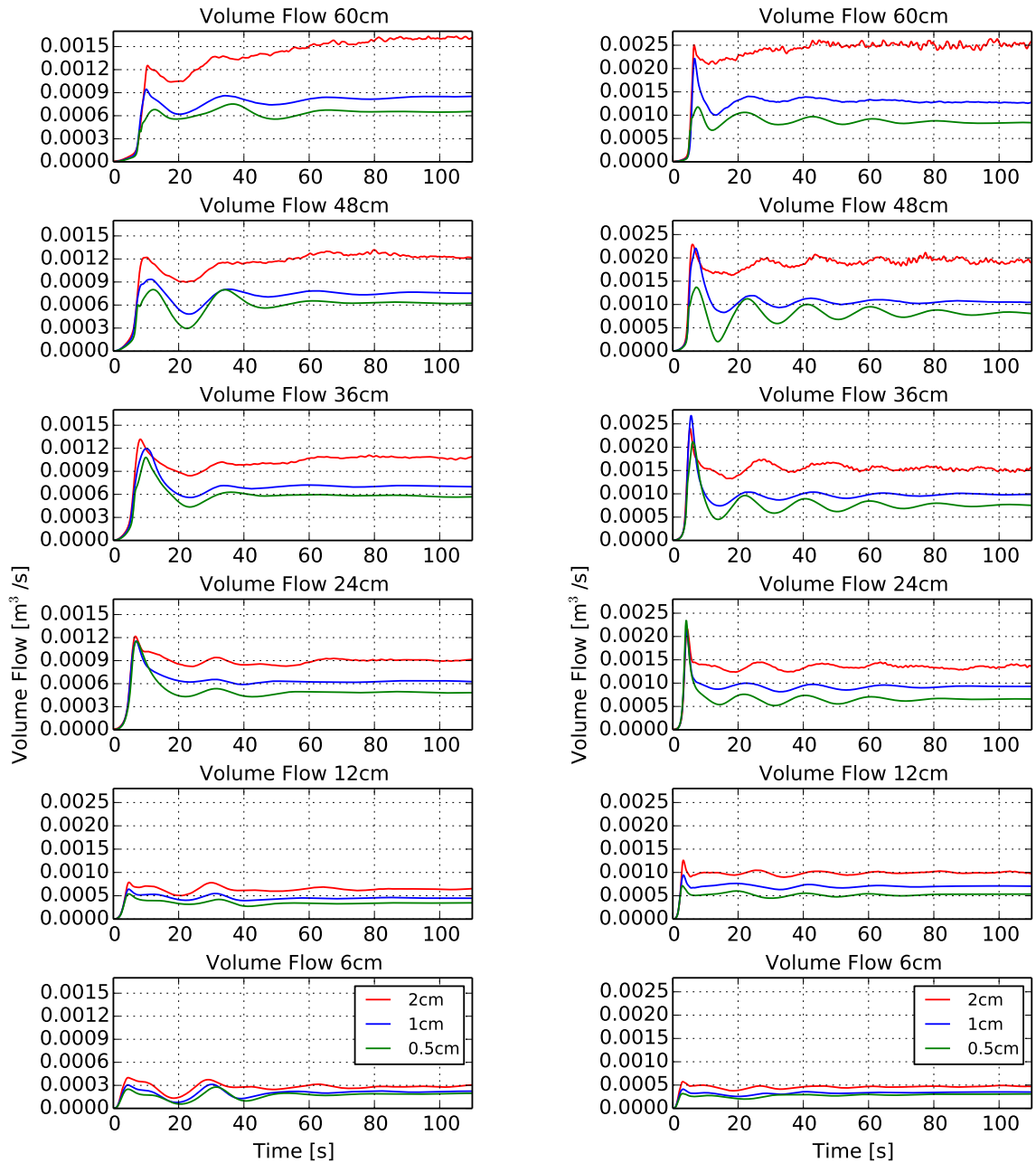
Gitterstudie Wärmestrom bei 250°C



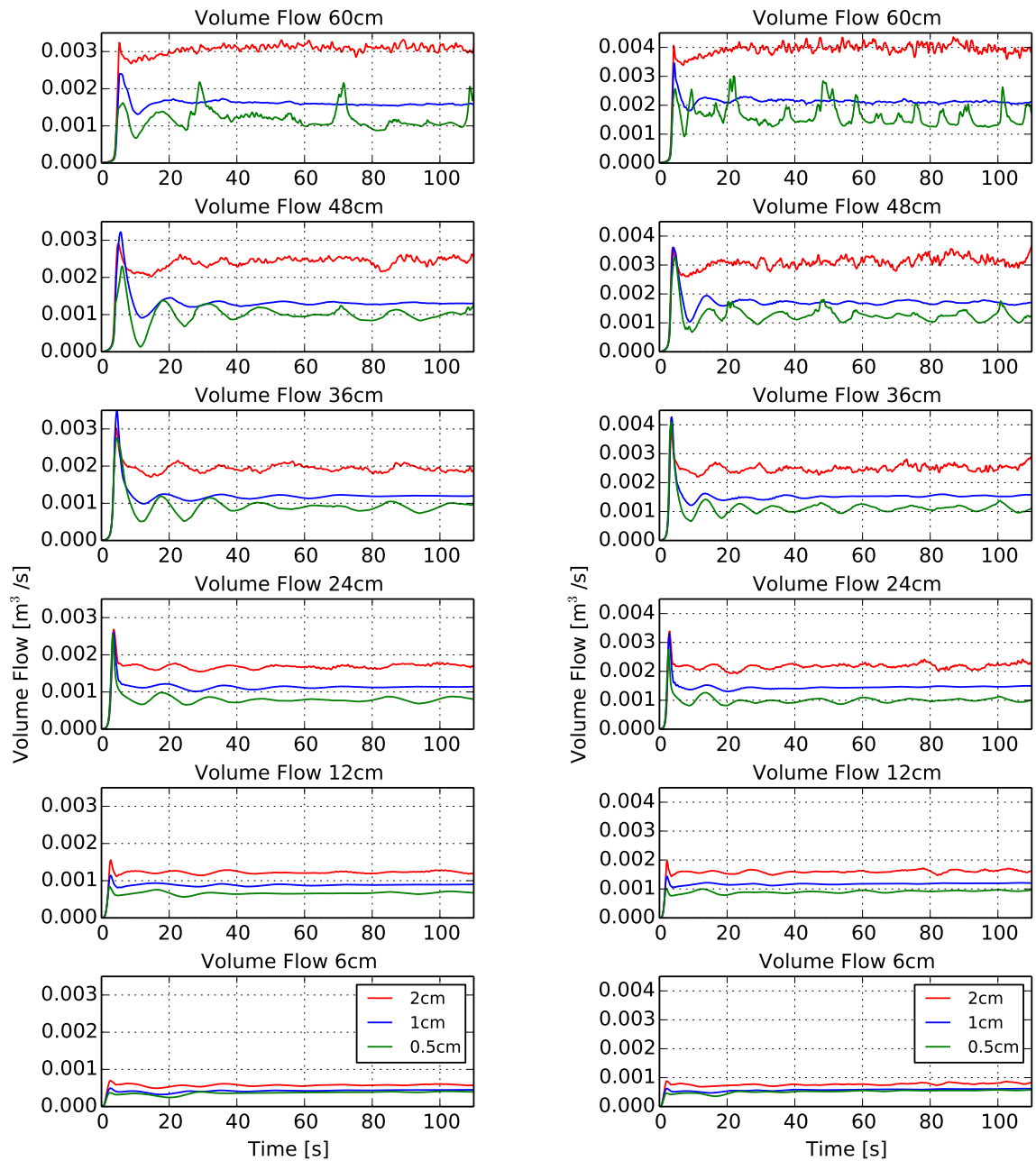
Gitterstudie Geschwindigkeiten bei 150°C (links) und 200°C (rechts)



Gitterstudie Volumenstrom bei 50°C (links) und 100°C (rechts)



Gitterstudie Volumenstrom bei 150°C (links) und 250°C (rechts)



Python Code Gitterstudie

```
# Bibs einladen
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#Einzulesende Daten definieren
data1 = ('Grid_250_2cm_devc.txt')
data2 = ('Grid_250_1cm_devc.txt')
data3 = ('Grid_250_05cm_devc.txt')

# Funktion zum Einlesen der Daten erstellen
def ReadFile(File)
    data = np.loadtxt(File, delimiter=',', skiprows=2) # Die ersten zwei Zeilen
                                                         des Textdokumentes
                                                         überspringen, bei ','
                                                         neue Spalte

    # Spalten den entsprechenden Variablen zuweisen
    time = data[:,0]
    heat_06 = data[:,1]    # Heat Flow
    heat_12 = data[:,2]
    heat_24 = data[:,3]
    heat_36 = data[:,4]
    heat_48 = data[:,5]
    heat_60 = data[:,6]
    Vol_06 = data[:,7]     # Volume Flow
    Vol_12 = data[:,8]
    Vol_24 = data[:,9]
    Vol_36 = data[:,10]
    Vol_48 = data[:,11]
    Vol_60 = data[:,12]
    mt_06 = data[:,13]     # Temperaturen mittig über dem Heizblock
    mt_12 = data[:,14]
    mt_24 = data[:,15]
    mt_36 = data[:,16]
    mt_48 = data[:,17]
    mt_60 = data[:,18]
    lt_06 = data[:,19]     # Temperaturen links neben dem Heizblock
    lt_12 = data[:,20]
    lt_24 = data[:,21]
    lt_36 = data[:,22]
    lt_48 = data[:,23]
    lt_60 = data[:,24]
    rt_06 = data[:,25]     # Temperaturen rechts neben dem Heizblock
    rt_12 = data[:,26]
    rt_24 = data[:,27]
    rt_36 = data[:,28]
```

```
rt_48 = data[:,29]
rt_60 = data[:,30]
vel_06 = data[:,31]    # Geschwindigkeiten
vel_12 = data[:,32]
vel_24 = data[:,33]
vel_36 = data[:,34]
vel_48 = data[:,35]
vel_60 = data[:,36]
t_12 = data[:,37]      # Temperaturen in einer Ecke
t_24 = data[:,38]
t_36 = data[:,39]
t_48 = data[:,40]
t_60 = data[:,41]
mtc_06 = data[:,42]    # Thermocouple mittig über dem Heizblock
mtc_12 = data[:,43]
mtc_24 = data[:,44]
mtc_36 = data[:,45]
mtc_48 = data[:,46]
mtc_60 = data[:,47]
ltc_06 = data[:,48]    # Thermocouple links neben dem Heizblock
ltc_12 = data[:,49]
ltc_24 = data[:,50]
ltc_36 = data[:,51]
ltc_48 = data[:,52]
ltc_60 = data[:,53]
rtc_06 = data[:,54]    # Thermocouple rechts neben dem Heizblock
rtc_12 = data[:,55]
rtc_24 = data[:,56]
rtc_36 = data[:,57]
rtc_48 = data[:,58]
rtc_60 = data[:,59]
tc_12 = data[:,60]     # Thermocouple in einer Ecke
tc_24 = data[:,61]
tc_36 = data[:,62]
tc_48 = data[:,63]
tc_60 = data[:,64]

# Funktion soll die folgenden Daten ausgeben
return time, heat_06, heat_12, heat_24, heat_36, heat_48, heat_60,
        Vol_06, Vol_12, Vol_24, Vol_36, Vol_48, Vol_60, mt_06, mt_12,
        mt_24, mt_36, mt_48, mt_60, lt_06, lt_12, lt_24, lt_36, lt_48, lt_60,
        rt_06, rt_12, rt_24, rt_36, rt_48, rt_60, vel_06, vel_12, vel_24,
        vel_36, vel_48, vel_60, t_12, t_24, t_36, t_48, t_60, mtc_06, mtc_12,
        mtc_24, mtc_36, mtc_48, mtc_60, ltc_06, ltc_12, ltc_24, ltc_36,
        ltc_48, ltc_60, rtc_06, rtc_12, rtc_24, rtc_36, rtc_48, rtc_60, tc_12,
        tc_24, tc_36, tc_48, tc_60
```

```
# Zuweisung von Datennamen für die jeweiligen Dateien
```

```
time1, heat1_06, heat1_12, heat1_24, heat1_36, heat1_48, heat1_60,  
Vol1_06, Vol1_12, Vol1_24, Vol1_36, Vol1_48, Vol1_60, mt1_06, mt1_12,  
mt1_24, mt1_36, mt1_48, mt1_60, lt1_06, lt1_12, lt1_24, lt1_36, lt1_48,  
lt1_60, rt1_06, rt1_12, rt1_24, rt1_36, rt1_48, rt1_60, vel1_06, vel1_12,  
vel1_24, vel1_36, vel1_48, vel1_60, t1_12, t1_24, t1_36, t1_48, t1_60,  
mtc1_06, mtc1_12, mtc1_24, mtc1_36, mtc1_48, mtc1_60, ltc1_06, ltc1_12,  
ltc1_24, ltc1_36, ltc1_48, ltc1_60, rtc1_06, rtc1_12, rtc1_24, rtc1_36, rtc1_48,  
rtc1_60, tc1_12, tc1_24, tc1_36, tc1_48, tc1_60 = ReadFile(data1)
```

```
time2, heat2_06, heat2_12, heat2_24, heat2_36, heat2_48, heat2_60,  
Vol2_06, Vol2_12, Vol2_24, Vol2_36, Vol2_48, Vol2_60, mt2_06, mt2_12,  
mt2_24, mt2_36, mt2_48, mt2_60, lt2_06, lt2_12, lt2_24, lt2_36, lt2_48,  
lt2_60, rt2_06, rt2_12, rt2_24, rt2_36, rt2_48, rt2_60, vel2_06, vel2_12,  
vel2_24, vel2_36, vel2_48, vel2_60, t2_12, t2_24, t2_36, t2_48, t2_60,  
mtc2_06, mtc2_12, mtc2_24, mtc2_36, mtc2_48, mtc2_60, ltc2_06, ltc2_12,  
ltc2_24, ltc2_36, ltc2_48, ltc2_60, rtc2_06, rtc2_12, rtc2_24, rtc2_36, rtc2_48,  
rtc2_60, tc2_12, tc2_24, tc2_36, tc2_48, tc2_60 = ReadFile(data2)
```

```
time3, heat3_06, heat3_12, heat3_24, heat3_36, heat3_48, heat3_60,  
Vol3_06, Vol3_12, Vol3_24, Vol3_36, Vol3_48, Vol3_60, mt3_06, mt3_12,  
mt3_24, mt3_36, mt3_48, mt3_60, lt3_06, lt3_12, lt3_24, lt3_36, lt3_48,  
lt3_60, rt3_06, rt3_12, rt3_24, rt3_36, rt3_48, rt3_60, vel3_06, vel3_12,  
vel3_24, vel3_36, vel3_48, vel3_60, t3_12, t3_24, t3_36, t3_48, t3_60,  
mtc3_06, mtc3_12, mtc3_24, mtc3_36, mtc3_48, mtc3_60, ltc3_06, ltc3_12,  
ltc3_24, ltc3_36, ltc3_48, ltc3_60, rtc3_06, rtc3_12, rtc3_24, rtc3_36, rtc3_48,  
rtc3_60, tc3_12, tc3_24, tc3_36, tc3_48, tc3_60 = ReadFile(data3)
```

```
# Funktion für einen gleichen Plot Stil
```

```
def applyPlotStyle()
```

```
plt.subplots_adjust(left=0.10,bottom=0.05,right=0.98,top=0.95,wspace=0.2,h  
space=0.5)
```

```
plt.xlim(0, 110)
```

```
# x-Achsen Begrenzung definieren
```

```
plt.grid()
```

```
# Gitter einfügen
```

```
# Erstellen einer Figur in der angegebenen Größe
```

```
plt.figure(figsize=(7, 12))
```

```
# Erstellen der Diagramme am Beispiel des HEAT FLOW
```

```
heat06 = plt.subplot(6, 1, 6) # Erstellet Subplots (Zeilen, Spalten, Plot-Nr.)
```

```
heat06.plot(time1, heat1_06, 'r', label='2 cm') # 2cm Kurve definieren
```

```
heat06.plot(time2, heat2_06, 'b', label='1 cm') # 1cm Kurve definieren
```

```
heat06.plot(time3, heat3_06, 'g', label='0.5 cm') # 0,5cm Kurve definieren
```

```
plt.ylim(0.0, 0.05) # y-Achsen Begrenzung definieren
```

```
plt.xlabel("Time [s]") # x-Achse beschriften
```

```
plt.title("Heat Flow 6cm", fontsize=12) # Titel hinzufügen
```

```
plt.legend(loc='upper right', fontsize=9) # Legende oben rechts, Schriftgr. 9
applyPlotStyle() # den definierten Plot Stil einfügen
```

```
heat12 = plt.subplot(6, 1, 5)
heat12.plot(time1, heat1_12, 'r', label='2 cm')
heat12.plot(time2, heat2_12, 'b', label='1 cm')
heat12.plot(time3, heat3_12, 'g', label='0.5 cm')
plt.ylim(0.0, 0.05)
plt.title("Heat Flow 12cm", fontsize=12)
applyPlotStyle()
```

```
heat24 = plt.subplot(6, 1, 4)
heat24.plot(time1, heat1_24, 'r', label='2 cm')
heat24.plot(time2, heat2_24, 'b', label='1 cm')
heat24.plot(time3, heat3_24, 'g', label='0.5 cm')
plt.ylim(0.0, 0.05)
plt.ylabel("Heat Flow [kW]") # y-Achse beschriften
plt.title("Heat Flow 24cm", fontsize=12)
applyPlotStyle()
```

```
heat36 = plt.subplot(6, 1, 3)
heat36.plot(time1, heat1_36, 'r', label='2 cm')
heat36.plot(time2, heat2_36, 'b', label='1 cm')
heat36.plot(time3, heat3_36, 'g', label='0.5 cm')
plt.ylim(0.0, 0.05)
plt.title("Heat Flow 36cm", fontsize=12)
applyPlotStyle()
```

```
heat48 = plt.subplot(6, 1, 2)
heat48.plot(time1, heat1_48, 'r', label='2 cm')
heat48.plot(time2, heat2_48, 'b', label='1 cm')
heat48.plot(time3, heat3_48, 'g', label='0.5 cm')
plt.ylim(0.0, 0.05)
plt.title("Heat Flow 48cm", fontsize=12)
applyPlotStyle()
```

```
heat60 = plt.subplot(6, 1, 1)
heat60.plot(time1, heat1_60, 'r', label='2 cm')
heat60.plot(time2, heat2_60, 'b', label='1 cm')
heat60.plot(time3, heat3_60, 'g', label='0.5 cm')
plt.ylim(0.0, 0.05)
plt.title("Heat Flow 60cm", fontsize=12)
applyPlotStyle()
```

```
# Erstellen eines PDF-Dokumentes
string = 'Gitterstudie_Heat.pdf'
plt.savefig(string)
```

Python Code Anfangstemperaturen

```
# Bibs einladen
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#Einzulesende Daten definieren
data3 = ('Grid_250_05cm_devc.txt')
data6 = ('Grid_250_05cm_devc1.txt')

# Funktion zum Einlesen der Daten erstellen
def ReadFile(File):
    # Erste zwei Zeilen des Textdokumentes überspringen, bei ',' neue Spalte
    data = np.loadtxt(File, delimiter=',', skiprows=2)

    # Spalten den entsprechenden Variablen zuweisen
    time = data[:,0]
    tc_12 = data[:,60]
    tc_24 = data[:,61]
    tc_36 = data[:,62]
    tc_48 = data[:,63]
    tc_60 = data[:,64]

    # Funktion soll die folgenden Daten ausgeben
    return time, tc_12, tc_24, tc_36, tc_48, tc_60

# Zuweisung von Datennamen für die jeweiligen Dateien
time3, tc3_12, tc3_24, tc3_36, tc3_48, tc3_60 = ReadFile(data3)
time6, tc6_12, tc6_24, tc6_36, tc6_48, tc6_60 = ReadFile(data6)

# Funktion für einen gleichen Plot Stil
def applyPlotStyle():
    plt.subplots_adjust(left=0.08,bottom=0.05,right=0.98,top=0.95,wspace=0.2,
                        hspace=0.5)
    plt.xlim(0, 180) # x-Achsen Begrenzung definieren
    plt.xticks(np.arange(0, 151, 10))
    plt.ylim(19.5, 28) # y-Achsen Begrenzung definieren
    plt.legend(loc='right', fontsize=12) # Legende rechts, Schriftgröße 12
    plt.grid() # Gitter einfügen

# Erstellen einer Figur in der angegebenen Größe
plt.figure(figsize=(15, 20))

tc12 = plt.subplot(5, 1, 5) # Erstellen Subplot (Zeilen, Spalten, Plot-Nr.)
tc12.plot(time3, tc3_12, color='y', label='no stratification') # Erste Kurve
tc12.plot(time6, tc6_12, color='orange', label='stratification') # Zweite Kurve
```

```
plt.xlabel("Time [s])           # x-Achse beschriften
plt.title("Thermocouple 12cm")  # Titel hinzufügen
applyPlotStyle()               # den definierten Plot Stil einfügen
```

```
tc24 = plt.subplot(5, 1, 4)
tc24.plot(time3,tc3_24, 'r', label='no stratification')
tc24.plot(time6,tc6_24, 'm', label='stratification')
plt.title("Thermocouple 24cm")
applyPlotStyle()
```

```
tc36 = plt.subplot(5, 1, 3)
tc36.plot(time3,tc3_36, color='purple', label='no stratification')
tc36.plot(time6,tc6_36, color='violet', label='stratification')
plt.ylabel("Temperature [centigrade]")# y-Achse beschriften
plt.title("Thermocouple 36cm")
applyPlotStyle()
```

```
tc48 = plt.subplot(5, 1, 2)
tc48.plot(time3,tc3_48, 'b', label='no stratification')
tc48.plot(time6,tc6_48, 'c', label='stratification')
plt.title("Thermocouple 48cm")
applyPlotStyle()
```

```
tc60 = plt.subplot(5, 1, 1)
tc60.plot(time3,tc3_60, 'g', label='no stratification')
tc60.plot(time6,tc6_60, color='lime', label='stratification')
plt.title("Thermocouple 60cm")
applyPlotStyle()
```

```
# Erstellen eines PDF/EPS/PNG-Dokumentes
```

```
string1 = 'Temperaturzonen_250.pdf'
```

```
string2 = 'Temperaturzonen_250.eps'
```

```
string3 = 'Temperaturzonen_250.png'
```

```
plt.savefig(string1)
```

```
plt.savefig(string2)
```

```
plt.savefig(string3)
```

```
# Plot anzeigen
```

```
plt.show()
```


Python Code Strömungsprofil ganz

```
# Bibs einladen
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Einzulesende Daten definieren
File=('Vektor_all.txt')

# Ersten zwei Zeilen des Textdokumentes überspringen, bei ',' neue Spalte
data = np.loadtxt(File, delimiter=',', skiprows=2)

# Spalten den entsprechenden Variablen zuweisen
X = data[:,0]
Y = data[:,1]
V = data[:,2]
VX = data[:,3]
VY = data[:,4]
VZ = data[:,5]

#Absolute Geschwindigkeit zur Farbvergebung berechnen
Color = V

# Erstellen einer Figur der angegebenen Größe
plt.figure(figsize = (10, 8))
plt.subplots_adjust(left = 0.07, bottom = 0.07, right = 1.0, top = 0.95)

# Vektorfeld mit Farbverlauf plotten
plt.quiver(X, Y, VX, VZ, Color)

# Hinzufügen einer Farbskala
plt.colorbar(label = 'Velocity [m/s]')

plt.xlabel('Width [m]')           # x-Achse beschriften
plt.ylabel('Height [m]')         # y-Achse beschriften
plt.title('Velocity')            # Titel hinzufügen
plt.ylim(0.0, 0.68)              # y-Achsen Begrenzung definieren
plt.yticks(np.arange(0.0, 0.71, 0.1))
plt.xlim(0.0, 0.8)               # x-Achsen Begrenzung definieren
plt.xticks(np.arange(0.0, 0.81, 0.1))
plt.axis('equal')                # Achsen im gleichen Verhältnis darstellen
plt.grid()                       # Gitter einfügen

# Erstellen eines PDF/EPS/PNG-Dokumentes
plt.savefig('Stromungsprofil_250_all.pdf')
```

Python Code Strömungsprofil 10cm mit Höhen

```
# Bibs einladen
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Einzulesende Daten definieren
File=('Vektor_10cm.txt')

# Ersten zwei Zeilen des Textdokumentes überspringen, bei ',' neue Spalte
data = np.loadtxt(File, delimiter=',', skiprows=2)

# Spalten den entsprechenden Variablen zuweisen
X = data[:,0]
Y = data[:,1]
V = data[:,2]
VX = data[:,3]
VY = data[:,4]
VZ = data[:,5]

#Absolute Geschwindigkeit zur Farbvergebung berechnen
Color = V

# Erstellen einer Figur der angegebenen Größe
plt.figure(figsize = (2.5, 7))
plt.subplots_adjust(left = 0.25, bottom = 0.07, right = 0.75, top = 0.95)

# Farbiges Vektorfeld plotten
plt.quiver(X, Y, VX, VZ, Color, width=0.05)

# Hinzufügen einer Farbskala
plt.colorbar(label = 'Velocity [m/s]')

plt.xlabel('Width [m]')           # x-Achse beschriften
plt.ylabel('Height [m]')         # y-Achse beschriften
plt.title('Velocity')            # Titel hinzufügen
plt.xlim(0.3, 0.48)              # x-Achsen Begrenzung definieren
plt.xticks(np.arange(0.3, 0.49, 0.06))
plt.axis('equal')                # Achsen im gleichen Verhältnis darstellen
plt.grid()                       # Gitter einfügen

# Horizontale farbige Linien einfügen, um ausgewählte Höhen zu kenn-
# zeichnen Horizontale weiße Linien, damit die farbigen Linien und
# Beschriftung besser sichtbar sind
plt.axhline(0.158, color='white', linewidth=15)
plt.axhline(0.15, color='g', linewidth=2)
plt.text(0.36, 0.155, '0,15 m', color='g')
```

```
plt.axhline(0.273, color='white', linewidth=15)
plt.axhline(0.265, color='b', linewidth=2)
plt.text(0.36, 0.27, '0,265 m', color='b')
plt.axhline(0.393, color='white', linewidth=15)
plt.axhline(0.385, color='m', linewidth=2)
plt.text(0.36, 0.39, '0,385 m', color='m')
plt.axhline(0.513, color='white', linewidth=15)
plt.axhline(0.505, color='r', linewidth=2)
plt.text(0.36, 0.51, '0,505 m', color='r')
plt.axhline(0.558, color='white', linewidth=15)
plt.axhline(0.55, color='orange', linewidth=2)
plt.text(0.36, 0.555, '0,550 m', color='orange')
```

```
# Erstellen eines PDF/EPS/PNG-Dokumentes
```

```
string1 = 'Stromungsprofil_250_all.pdf'
```

```
string2 = 'Stromungsprofil_250_all.eps'
```

```
string3 = 'Stromungsprofil_250_all.png'
```

```
plt.savefig(string1)
```

```
plt.savefig(string2)
```

```
plt.savefig(string3)
```

```
# Plot anzeigen
```

```
plt.show()
```

Python Code Geschwindigkeitskomponente „w“

```
# Bibs einladen
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Einzulesende Daten definieren
File=('Vektor_10cm.txt')

# Ersten zwei Zeilen des Textdokumentes überspringen, bei ',' neue Spalte
data = np.loadtxt(File, delimiter=',', skiprows=2)

# Spalten den entsprechenden Variablen zuweisen
X = data[:,0]
Z = data[:,1]
VZ = data[:,5]

# Erstellen von leeren Listen
vz = []
all_vz = []
all_z = []

# Geht die Liste von Z durch und guckt welche z-Werte gleich sind und
# packt sie in die vz Liste. Wenn sie nicht mehr gleich sind, packt er die
# alten z-Werte in eine neue Liste all_z, dann wird die vz Liste gelöscht für
# die nächsten z-Werte
z_act = Z[0]
for i in range(len(VZ) -1):
    if Z[i] == z_act:
        vz.append(VZ[i])
    else:
        all_vz.append(vz)
        all_z.append(z_act)
        vz=[]
        vz.append(VZ[i])
        z_act = Z[i+1]

# Raussuchen der dazugehörigen x-Werte
x = X[:len(all_vz[0])]

# Eine Liste erstellen, die nur ausgewählte z-Einträge (Höhen) beinhaltet
zn=[]
for i in range(len(all_z)):
    if all_z[i] == 0.15:
        zn.append(i)
    elif all_z[i] == 0.265:
        zn.append(i)
```

```

elif all_z[i] == 0.385:
    zn.append(i)
elif all_z[i] == 0.505:
    zn.append(i)
elif all_z[i] == 0.55:
    zn.append(i)

# Definition für einen gleichen Plot Stil
def applyPlotStyle(i, j, f, s):
    plt.subplot(5, 1, i) # Erstellen eines Subplots (Zeilen, Spalten, Plot-Nr.)
    plt.plot(x, all_vz[j], label='y=%.3f'%all_z[j], color='%s'%f) # Kurve
    plt.xticks([ ]) # x-Achse zunächst ausblenden
    plt.ylim(0, 0.75) # y-Achsen Begrenzung
    definieren
    plt.yticks(np.arange(0.0, 0.71, 0.1))
    plt.legend(loc='upper right', fontsize=12) # Legende oben rechts
    # Text einfügen, der das Integral der Kurve beschreibt
    plt.text(0.38, 0.05, '%.4f [%m^2/s$]'%s, color='%s'%f, fontsize=12)
    plt.grid(linestyle=':', color='grey') # Gitter einfügen
    plt.axvline(0.36, linestyle=':', color='grey')
    plt.axvline(0.38, linestyle=':', color='grey')
    plt.axvline(0.40, linestyle=':', color='grey')
    plt.axvline(0.42, linestyle=':', color='grey')

# Definition zum Beschriften der y-Achse
def applyPlotStyle_y(i, j, f, s):
    plt.subplot(5, 1, i) # Erstellen eines Subplots (Zeilen, Spalten,
    Plot-Nr.)
    plt.ylabel('Velocity [m/s]') # y-Achse beschriften

# Definition zum Beschriften der x-Achse
def applyPlotStyle_x(i, j, f, s):
    plt.subplot(5, 1, i) # Erstellen eines Subplots (Zeilen, Spalten, Plot-Nr.)
    plt.xlabel('Width [m]') # x-Achse beschriften
    plt.xticks(np.arange(0.34, 0.45, 0.02)) # x-Achsen Begrenzung

# Erstellen einer Figur in der angegebenen Größe
plt.figure(figsize=(7, 7))
plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.07, right=0.95, top=0.95, hspace=0.2)

# Schleife zum Erstellen der Diagramme der z-Geschwindigkeit über die
# ausgewählten Höhen
for i in range(len(zn)):
    j=zn[i]
    f=['g', 'b', 'm', 'r', 'orange'] # Zuweisen einer Farbe für jede Kurve
    # Berechnung des Integrals der entsprechenden Kurve
    s=np.sum(all_vz[j]) * (x[1]-x[0])

```

```
if i != 0 or 2:          # Für alle Höhen außer der ersten und dritten
    applyPlotStyle(-i, j, f[i], s)  # Allgemeinen Plot Stil einfügen
if i == 2:
    applyPlotStyle_y(-i, j, f[i], s) # Plot Stil zur Beschriftung der y-Achsen
if i == 0:
    applyPlotStyle_x(-i, j, f[i], s) # Plot Stil zur Beschriftung der x-Achse

plt.title('Velocity')      # Titel hinzufügen

# Erstellen eines PDF/EPS/PNG-Dokumentes
string1 = 'Z_Geschwindigkeit_250_10cm.pdf'
string2 = 'Z_Geschwindigkeit_250_10cm.pdf'
string3 = 'Z_Geschwindigkeit_250_10cm.pdf'
plt.savefig(string1)
plt.savefig(string2)
plt.savefig(string3)
```

Python Code Standardabweichung Simulationen

```
# Bibs einladen
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import glob

# x-Werte definieren
x_min = 0.34
x_max = 0.44
x_step = 0.005
array_width = int(round((x_max-x_min)/x_step+1.))

# y-Werte definieren
y_min = 0.0
y_max = 0.66
y_step = 0.005
array_length = int(round((y_max-y_min)/y_step+1.))

# Anzahl der Aufnahmen definieren
number_of_frames = 51

# Einzulesende Daten definieren
filelist = glob.glob('data/*.txt')

# Funktion zum Umwandeln der Daten in die Form der Messfläche
def convert2array(file):
    array_single_frame = np.zeros([array_length, array_width])

    for r in file[:, (0, 1, 3)]:
        x_index=int(round((r[0]-x_min)*1./x_step)) # berechnet x_index

        # berechnet y_index Achtung! ≠ geometrische Werte
        y_index=int(round((r[1]-y_min)*1./y_step))

        # fügt die Werte in den leeren Array
        array_single_frame[y_index, x_index] = r[2]

    # Funktion soll den array_single_frame ausgeben
    return array_single_frame

# Erstellen eines Arrays zum Sammeln der Daten jeder Spalte, aus allen
# Aufnahmen
collect_array = np.zeros([array_length, number_of_frames])

# Schleife zum Einfügen der Werte der 10. Spalte (Hochachse) in die Array-
```

```
# Sammlung
for fn in range(len(filelist)):

    # Einlesen der Dateien
    d = np.loadtxt('%s'%filelist[fn], delimiter=',', skiprows=2)
    a = convert2array(d)          # Funktion für jeder Datei durchlaufen
    collect_array[:,fn]=a[:,10]   # Einfügen der 10. Spalte

# Erstellen eines Array zum Speichern der Standardabweichungen
std_array = np.zeros([array_length, 1])

# Schleife durchläuft alle Zeilen der collect_array um die Standard-
# abweichung zu berechnen
for r, val in enumerate(collect_array[:,0]):
    std_array[r, 0] = np.std(collect_array[r,:])

# Erstellen einer Figur in der angegebenen Größe
plt.figure(figsize=(2.4, 7))
plt.subplots_adjust(left=0.25, bottom=0.07, right=0.85, top=0.95)

y_vals = np.arange(y_min,y_max+y_step,y_step)  # y-Wert der Kurve
definieren
plt.plot(std_array[:, 0], y_vals[:])            # Kurve definieren

plt.title('250 centigrade', fontsize=12)         # Titel in Größe 12 hinzufügen
plt.xlim(-0.01, 0.15)                          # x-Achsen Begrenzung
plt.xticks(np.arange(-0.0, 0.16, 0.05))
plt.xlabel('Standard deviation [m/s]')          # x-Achse beschriften
plt.ylabel('Height [m]')                       # y-Achse beschriften
plt.axis('equal')                             # Achsen im gleichen Verhältnis darstellen
plt.grid()                                     # Gitter einfügen

# Erstellen eines PDF/EPS/PNG-Dokumentes
string1 = 'Standardabweichung_250_neu.pdf'
string2 = 'Standardabweichung_250_neu.eps'
string3 = 'Standardabweichung_250_neu.png'
plt.savefig(string1)
plt.savefig(string2)
plt.savefig(string3)

# Plot anzeigen
plt.show()
```


Python Code Standardabweichung Experimente

```
# Bibs einladen
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import glob

# Funktion zum Öffnen der Daten
def ReadFile(File, From=1, To=-1):
    k = open(File)
    k.readline()
    dataSet = k.readlines()

    #Listen für Datenreihen erstellen
    X = []
    Y = []
    VX = []
    VY = []

    # Schleife zum Umwandeln von , und .
    for data in dataSet:
        data = data.replace('\n','')
        data = data.replace(',','.')
        entry = data.split('\t')

        # Umgewandelte Daten den Listen anhängen
        X.append(float(entry[0]))
        Y.append(float(entry[1]))
        VX.append(float(entry[2]))
        VY.append(float(entry[3]))

    # Listen in Arrays umwandeln
    X = np.array(X)
    Y = np.array(Y)
    VX = np.array(VX)
    VY = np.array(VY)

    k.close() # Datei wieder schließen

    return X, Y, VX, VY #Funktion soll die Arrays ausgeben

#Funktion zur Verteilung einer einheitlichen Farbe im Bild
def Colorarray(vx_neu,vy_neu):
    colorarray = np.sqrt(vx_neu**2+vy_neu**2) # Farbverlauf

    return colorarray #Funktion soll Wert zur Farbverteilung ausgeben
```

```
# Verschiebung der Bilder festlegen
y_shift = [90, 90, 197, 304, 408, 513]

# Ordner definieren aus denen die Daten entnommen werden
dirs = glob.glob('data_*')

# Erstellen einer Figur in der angegebenen Größe
plt.figure(figsize=(3, 7))
plt.subplots_adjust(left=0.21, bottom=0.07, right=0.94, top=0.95)

# Schleife zum Aufrufen der Daten in den Ordnern
for index, direct in enumerate(dirs):
    data = glob.glob('%s/*.txt'%direct)

    #Erzeugen leerer Listen für die globalen Werte
    global_x = [ ]
    global_y = [ ]
    global_vx = [ ]
    global_vy = [ ]

#Schleife erstellen um Bilder übereinander zusammenzufügen
for k in data:
    X, Y, VX, VY = ReadFile(k)      # Funktion öffnet Daten
    Y = Y + y_shift[index]          # Verschiebung addieren

    # Daten den Listen anhängen
    global_x.append(X)
    global_y.append(Y)
    global_vx.append(VX)
    global_vy.append(VY)

# Definieren der Wertebereiche des Gitters für das zu erzeugende Bild
x_min = -50.0
x_max = 50.0
dx = 3.0          #Abstand der Gitterlinien
y_min = -90.0
y_max = 650.0
dy = 3.0

# Erstellen des Rasters
sx = np.arange(x_min, x_max, dx)
sy = np.arange(y_min, y_max, dy)

#Erstellen der Gitterpunkte
gx, gy = np.meshgrid(sx, sy)
gvx = gx * 0.0
gvx_n = gx * 0.0
```

```
gsdvx = gx * 0.0
# Schleife, um jeden Ordner zu durchlaufen
for j in range(len(data)):
    # Schleife, um jede Datei im Ordner aufzurufen
    for i in range(len(global_x[j])):
        #in jedem Bild jeden Bildpunkt
        x = global_x[j][i]
        y = global_y[j][i]
        vx = global_vx[j][i]
        ix = (x-x_min) / dx
        iy = (y-y_min) / dy
        gvz_n[iy, ix] += 1
        gvz[iy, ix] += vx    # Summe Strömung in y Richtung

gvz /= gvz_n                #Mittlung

# Schleife, um jeden Ordner zu durchlaufen
for j in range(len(data)):
    # Schleife, um jede Datei im Ordner aufzurufen
    for i in range(len(global_x[j])):
        #in jedem Bild jeden Bildpunkt
        x = global_x[j][i]
        y = global_y[j][i]
        vx = global_vx[j][i]
        ix = (x-x_min) / dx
        iy = (y-y_min) / dy

        gsdvx[iy, ix] += (vx - gvz[iy, ix])**2 # Berechnung der Varianz
gsdvx /= gvz_n              # Mittlung
gsdvx = np.sqrt(gsdvx)      # Wurzel der Varianz = Standardabweichung

ix_0 = (0.0-x_min) / dx    # x-Werte in der Mittelachse (Punkt 0.0)
iy_0 = (0.0-y_min) / dy    # y-Werte erst ab Achsenpunkt 0.0 darstellen

# Plotten der Standardabweichung der Mittelachse
plt.plot(gsdvx[iy_0:, ix_0], sy[iy_0:], label = "data %d"%index)

plt.title('250 centigrade', fontsize=12)    # Titel hinzufügen
plt.xlim(-0.01, 0.251)                    # x-Achsen Begrenzung
plt.xticks(np.arange(-0.0, 0.251, 0.05))
plt.xlabel('Standard deviation [m/s]')      # x-Achsen Beschriftung
plt.ylabel('Height [mm]')                  # y-Achsen Beschriftung
plt.grid()                                # Gitter einfügen

# Erstellen eines PDF-Dokumentes
plt.savefig('Standardabweichung_Exp_250_neu.pdf')
```